

AVIATION CIVILE ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES : COMMENT RÉDUIRE  
L'EMPREINTE CARBONE GRÂCE À LA TARIFICATION DU CARBONE ET AU  
DÉVELOPPEMENT DE CARBURANTS ALTERNATIFS?

Par  
Marie-Lee Pelletier

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement  
et en développement durable en vue de l'obtention du grade de maîtrise  
en environnement (M. Env.)

Sous la direction de François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Janvier 2020

*“The desire to fly is an idea handed down to us by our ancestors who...  
looked enviously on the birds soaring freely through space...  
on the infinite highway of the air.”*

*Wilbur Wright, inventor and aviation pioneer (1867 – 1912)*

“Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les  
plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles  
qui s'adaptent le mieux aux changements.”

Charles Darwin, biologiste, naturaliste (1809 – 1882)

## SOMMAIRE

Mots-clés : changements climatiques, gaz à effet de serre, aviation civile, tarification du carbone, carburants alternatifs, empreinte carbone, taxe carbone, marché du carbone, Canada

La croissance marquée du trafic aérien prévue pour les prochaines années génère des inquiétudes dans le contexte actuel de lutte contre les changements climatiques puisque, selon l'Accord de Paris, les émissions globales de gaz à effet de serre doivent rapidement culminer pour chuter vers la carboneutralité d'ici 2050. C'est dans cette perspective que l'aviation civile a adopté, il y a quelques années, des objectifs ambitieux ainsi qu'une stratégie environnementale dont les deux mesures phares sont la tarification du carbone et le développement des carburants alternatifs.

Le but de cet essai est de trouver des pistes de solutions pour permettre à l'industrie aérienne de réduire son empreinte carbone. L'aviation civile et ses conséquences sur l'environnement sont tout d'abord énoncées globalement. Par la suite, une revue des événements importants, ayant marqué le secteur aérien en matière d'environnement, est présentée. Le portrait de l'aviation civile canadienne et de ses émissions de GES est aussi dressé. Ensuite, les cibles environnementales du secteur sont comparées à celles de l'Accord de Paris et à celles d'autres modes de transport au Canada. Le cœur de l'essai se concentre sur l'applicabilité de la taxe carbone et du marché du carbone au secteur aérien et sur les facteurs influençant le développement et la commercialisation des carburants alternatifs durables.

Plusieurs recommandations sont formulées afin de favoriser la décarbonisation du secteur aérien. Celles-ci portent notamment sur le Programme de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale. Les critères d'éligibilité des crédits de compensation et des carburants alternatifs seront déterminants dans la crédibilité du programme pour mener à une baisse réelle des émissions de gaz à effet de serre. L'élaboration d'une méthodologie claire pour minimiser le risque de double comptage des crédits de compensation est un autre élément important dans la réussite du programme. Par ailleurs, l'industrie devrait évaluer la possibilité d'imposer une taxe au transport aérien international dans le but de rétablir le déséquilibre existant avec le transport national. De son côté, le Canada devrait redéfinir les objectifs du Plan d'action pour réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'aviation afin d'en assurer un meilleur suivi. Le gouvernement devrait également appliquer le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques et la Norme sur les combustibles propres au carburant destiné aux aéronefs. De manière générale, les mesures mises en place pour réduire l'impact environnemental du secteur aérien devraient aussi couvrir les effets non associés aux émissions de dioxyde de carbone. À cet effet, une nouvelle étude globale, portant sur les impacts de l'aviation sur le réchauffement climatique, permettrait à l'industrie d'avoir une meilleure compréhension de la contribution de ces effets sur le forçage radiatif total de l'aviation.

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur d'essai, monsieur François Lafortune, pour m'avoir guidée et amenée à pousser ma réflexion. Merci pour son temps, ses encouragements et pour toutes ces discussions que nous avons eues, toujours plus intéressantes les unes que les autres!

Je désire également à remercier les différents intervenants de l'industrie aérienne avec qui j'ai eu la chance et le plaisir d'échanger. Mes sincères remerciements à Alexandru de Groupe Conseil Carbone, Simon de Transport Canada, Haldane de l'Association internationale du transport aérien et Jim, consultant en aviation et en développement durable. Vos propos m'ont permis d'aborder la problématique selon différentes perspectives.

Merci à Hugo, *my partner in crime*. Merci de m'avoir lue, de m'avoir partagé tes opinions et de m'avoir endurée me plaindre à quelques reprises! Ton support et tes encouragements m'ont permis de donner le meilleur de moi-même. Merci d'avoir été à mes côtés tout au long de ce projet.

Merci à mes parents, Lyne et Claude, pour m'avoir toujours supportée dans ce que j'entreprenais. Merci de m'avoir appris la persévérance et la ténacité. Sans ces valeurs, mon essai n'aurait pu voir le jour!

Merci à Karine pour m'avoir aidée à réviser mon orthographe! Un bon contenu ne peut être livré que dans un bon contenant!

Et finalement, merci à vous, chers lecteurs.

J'aspire, à travers cet essai, à engendrer une prise de conscience collective et ainsi contribuer, un tant soit peu, à la transformation de notre mobilité.



## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
1. AVIATION CIVILE ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES .....	4
1.1 Évolution de l'aviation civile à l'échelle internationale .....	4
1.2 Impacts sur l'environnement.....	5
1.2.1 Pollution sonore .....	6
1.2.2 Qualité de l'air .....	7
1.2.3 Changements climatiques et forçage radiatif.....	7
1.3 Portrait des émissions de GES du secteur.....	10
1.4 Aperçu des progrès réalisés en matière de réduction d'impacts environnementaux.....	10
1.4.1 Technologies liées aux aéronefs .....	10
1.4.2 Gestion du trafic aérien et des opérations .....	12
1.4.3 Normes et réglementation.....	14
1.5 Quel avenir pour le secteur aérien? .....	15
1.5.1 Émergence des pays en développement .....	15
1.5.2 Gestion du progrès technologique .....	16
1.5.3 Incertitude liée au contexte géopolitique .....	17
1.5.4 Croissance durable .....	17
2. ACCORDS INTERNATIONAUX ENCADRANT L'AVIATION CIVILE EN MATIÈRE DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT .....	18
2.1 Synthèse des événements importants et contexte politique .....	18
2.1.1 Convention de Chicago et création de l'OACI (1944).....	18
2.1.2 Protocole de Kyoto (1997) .....	19
2.1.3 Adoption du programme d'action sur l'aviation internationale et les changements climatiques (2009).....	19
2.1.4 Décision de l'OACI d'adopter un mécanisme basé sur le marché (2013) .....	20
2.1.5 Accord de Paris (2015) .....	20
2.2 Stratégie de réduction de CO <sub>2</sub> de l'OACI .....	21
2.2.1 Nouvelles technologies liées à la performance des avions .....	21

2.2.2	Nouvelles technologies liées aux procédures opérationnelles .....	22
2.2.3	Programme de compensation et de réduction de crédits de carbone CORSIA .....	23
2.2.4	Développement de carburants alternatifs durables .....	25
2.2.5	Effet cumulatif du panier de mesures en matière de réduction de CO <sub>2</sub> .....	26
3.	L'AVIATION CIVILE AU CANADA .....	28
3.1	Évolution de l'aviation civile à l'échelle nationale .....	28
3.2	Portrait des émissions de GES du secteur .....	29
3.3	Plan d'action du Canada pour réduire les émissions de GES provenant de l'aviation .....	30
3.3.1	État actuel du plan d'action .....	31
3.4	Politiques nationales visant à réduire les émissions de GES .....	31
3.4.1	Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques .....	32
3.4.2	Norme sur les combustibles propres .....	32
4.	CIBLES ENVIRONNEMENTALES EN MATIÈRE DE RÉDUCTION DE GES DANS LE DOMAINE DE L'AVIATION CIVILE .....	34
4.1	Échelle internationale .....	35
4.2	Échelle nationale .....	36
4.3	Engagements du Canada en comparaison à d'autres pays industrialisés .....	40
4.3.1	Mesures mises en place à l'international dans le domaine de l'aviation .....	41
4.4	Engagement de l'aviation civile en comparaison avec d'autres secteurs .....	42
4.4.1	Comparaison à l'échelle internationale avec le transport maritime .....	42
4.4.2	Comparaison à l'échelle nationale avec le transport ferroviaire et routier .....	44
5.	TARIFICATION DU CARBONE POUR LE SECTEUR AÉRIEN ET APPLICABILITÉ AU CANADA ..	48
5.1	La taxe carbone .....	48
5.1.1	Qu'est-ce qu'est? .....	49
5.1.2	Avantages et inconvénients .....	49
5.1.3	La taxe carbone appliquée au secteur aérien .....	50
5.1.4	Applicabilité au Canada .....	54
5.2	Le marché du carbone .....	57
5.2.1	Le marché réglementé .....	58

5.2.2	Le marché volontaire .....	59
5.2.3	Le marché du carbone appliqué au secteur aérien .....	60
5.2.4	Applicabilité au Canada .....	68
6.	LES CARBURANTS ALTERNATIFS DANS LE DOMAINE DE L'AVIATION CIVILE : UNE SOLUTION DURABLE? .....	69
6.1	L'évolution des biocarburants .....	70
6.1.1	Les biocarburants de première génération .....	70
6.1.2	Les biocarburants de deuxième génération .....	71
6.1.3	Les biocarburants de troisième génération .....	71
6.1.4	Les carburants alternatifs durables (SAF) .....	72
6.2	Les défis de la décarbonisation .....	73
6.3	La route vers la commercialisation .....	75
6.4	Technologies de fabrication de carburants alternatifs à l'étude .....	78
6.4.1	Capture et séquestration du carbone .....	78
6.4.2	Déchets et biomasses .....	80
6.4.3	Lipides et graisses .....	81
6.5	Analyse comparative .....	82
6.5.1	Résultats et discussion .....	82
6.5.2	Contraintes et limites de l'analyse comparative .....	84
7.	RECOMMANDATIONS .....	86
7.1	À l'intention de l'OACI à l'égard de l'aviation civile internationale .....	86
7.2	À l'intention du gouvernement du Canada à l'égard de l'aviation civile nationale .....	87
7.3	Recommandations générales .....	88
	CONCLUSION .....	89
	RÉFÉRENCES .....	91
	ANNEXE 1 – PAYS PARTICIPANTS À LA PHASE VOLONTAIRE DU PROGRAMME CORSIA .....	106
	ANNEXE 2 – TAXES AÉRIENNES MISES EN PLACE DANS DIFFÉRENTS PAYS .....	107

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1 : Tendence du trafic aérien (1977-2037).....	4
Figure 1.2 : Contaminants résultant de la combustion de carburant .....	6
Figure 1.3 : Constituants du forçage radiatif relatif au secteur aérien .....	8
Figure 1.4 : Évolution technologique des modèles d'avions .....	11
Figure 1.5 : Opération en descente continue .....	13
Figure 1.6 : Ambitions de SESAR relatives aux objectifs du Ciel unique européen .....	14
Figure 1.7 : Taux de croissance annuel du marché aérien (2017-2037) .....	15
Figure 1.8 : Les 10 plus grands marchés de passagers au fil des ans .....	16
Figure 2.1 : Limites imposées par la norme sur le carbone .....	21
Figure 2.2 : L'approche ASBU .....	23
Figure 2.3 : Évolution des requis de compensation .....	24
Figure 2.4 : Approche CORSIA basée sur les routes .....	25
Figure 2.5 : Contributions des mesures visant à réduire les émissions de CO <sub>2</sub> de l'aviation civile internationale.....	27
Figure 3.1 : Trafic aérien passager au Canada .....	28
Figure 3.2 : Répartition des émissions de GES par secteur .....	29
Figure 3.3 : Variation des émissions de GES par secteur (2005-2017).....	30
Figure 4.1 : Scénarios limitant le réchauffement planétaire à 1,5 °C .....	34
Figure 4.2 : Projections d'émissions de GES au Canada d'ici 2030 .....	37
Figure 4.3 : Détails des réductions d'émissions de GES d'ici 2030 .....	38
Figure 4.4 : Écart entre les cibles CPDN et la limite de 1,5 °C selon l'Accord de Paris .....	40
Figure 4.5 : Projections du commerce maritime international vs d'ici 2050 .....	43
Figure 5.1 : Taxes moyennes liées au transport aérien .....	50
Figure 5.2 : Taxes moyennes par passager (domestique et international vs international seulement).....	51
Figure 5.3 : Émissions de CO <sub>2</sub> par vol en partance de Frankfurt.....	53
Figure 5.4 : Revenus projetés des taxes dans le secteur aérien domestique .....	56
Figure 5.5 : Comptabilisation des unités de réduction des émissions certifiées par MDP .....	58
Figure 5.6 : Approvisionnement potentiel en crédits de carbone selon différents scénarios .....	65



Figure 5.7 : Proportions des émissions de CO <sub>2</sub> réduites selon différentes options (efficacité CER à 100 % vs à 20 %)	67
Figure 6.1 : Exemples d'hydrocarbures saturés (alcanes) entrant dans la fabrication du kérosène	69
Figure 6.2 : Coût de la matière première vs complexité technique	71
Figure 6.3 : Intensité carbonique des biocarburants groupés par procédé de fabrication et type de matière première	74
Figure 6.4 : Aperçu du processus de certification ASTM	76
Figure 6.5 : Contribution potentielle des carburants alternatifs aux réductions d'émissions de GES du secteur de l'aviation internationale	77
Figure 6.6 : Procédé « Capture directe de l'air » de Carbon Engineering	79
Figure 6.7 : Procédé de CO <sub>2</sub> Solutions Inc.	80
Figure 6.8 : Procédé de gazéification d'Enerkem	81
Figure 6.9 : Procédé LTH	82
Tableau 3.1 : Exigences de réduction et limites annuelles d'intensité en carbone	33
Tableau 4.1 : Cibles de réduction des gouvernements provinciaux et territoriaux	39
Tableau 4.2 : Comparaison entre secteur aérien et maritime	42
Tableau 4.3 : Émissions de GES du Canada par secteur du GIEC (Mt d'éq. CO <sub>2</sub> )	44
Tableau 5.1 : Taxes appliquées au transport domestique et international au Canada	55
Tableau 5.2 : Scénarios basés sur l'ancienneté	63
Tableau 5.3 : Scénarios basés sur la vulnérabilité	63
Tableau 5.4 : Scénario basé sur l'origine des projets	64
Tableau 5.5 : Scénarios basés sur l'effet du double comptage	64
Tableau 5.6 : Différences entre l'application du système EU ETS et du programme CORSIA au secteur aérien	66
Tableau 5.7 : Scénario de compatibilité entre CORSIA et EU ETS pour le secteur aérien	67
Tableau 6.1 : Procédés de fabrication de SAF certifiés par l'ASTM	73
Tableau 6.2 : Analyse comparative	83

## LISTE DES ACRONYMES ET SYMBOLES CHIMIQUES

ACV	Analyse de cycle de vie
AIC	<i>Aircraft induced clouds</i>
ASBU	<i>Aviation system block upgrade</i>
ATCATF	Affectation des terres, des changements d'affectation des terres et de la foresterie
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATAG	<i>Air Transport Action Group</i>
dBA	Décibel, unité de mesure du bruit
CAEP	Comité de la protection de l'environnement en aviation
CAR	<i>Climate Action Reserve</i>
CDO	Opérations en descente continue
CER	<i>Certified Emission Reductions</i>
CORSIA	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i>
CH <sub>4</sub>	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CPC	Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques
CPDN	Contributions prévues déterminées au niveau national
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EJ	Exajoule (10 <sup>18</sup> ), unité de mesure d'énergie
EU ETS	<i>European Union Emission trading system</i>
FR	Forçage radiatif
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GS	<i>Gold Standard</i>
Gt	Gigatonne (10 <sup>9</sup> ), unité de mesure de masse
H <sub>2</sub> O	Eau
HEFA	<i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i>
IATA	Association internationale du transport aérien

Kg	Kilogramme, unité de mesure de masse
Km	Kilomètre, unité de mesure de distance
LDC	<i>Least Developed Countries</i>
LTH	<i>Lipid-to-Hydrocarbon</i>
MBM	Mécanisme basé sur le marché
MDP	Mécanisme de développement propre
MJ	Mégajoule ( $10^6$ ), unité de mesure d'énergie
MOC	Mise en œuvre conjointe
Mt	Mégatonne ( $10^6$ ), unité de mesure de masse
NCP	Norme sur les combustibles propres
NO	Monoxyde d'azote
NO <sub>2</sub>	Dioxyde d'azote
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote
nvPM	<i>Non-volatile particulate matter</i>
OMI	Organisation maritime internationale
ONU	Organisation des Nations Unies
OACI	Organisation internationale de l'aviation civile
SAF	<i>Sustainable Aviation Fuel</i>
SESAR	<i>Single European sky ATM research</i>
SIDS	<i>Small Islands Developing States</i>
SO <sub>x</sub>	Oxydes de soufre
TKP	Tonne-kilomètre payante
TVA	Taxe sur la valeur ajoutée
UE	Union Européenne
VCS	<i>Verified Carbon Standard</i>
VER	<i>Voluntary Emission Reductions</i>

## LEXIQUE

Additionnalité	« Critère à remplir pour la délivrance de crédits compensatoires. Réduction d'émissions de GES qui n'a pas eu lieu pendant le cours normal des affaires, qui va au-delà de la réglementation en vigueur et des pratiques courantes et qui n'aurait pas eu lieu sans incitatif supplémentaire. » (Environnement et Lutte contre les changements climatiques, s. d.)
<i>Big data</i>	Données massives. En raison de leur quantité et de leur volume, les outils classiques de gestion sont incapables de traiter convenablement ces données. (MBA ESG, s.d.)
Biomasse	Tout matériel renouvelable, y compris les déchets et résidus d'origine biologiques (plantes, algues, graisses animales, etc.) (Air Transport Action Group [ATAG], 2017)
Connectivité aérienne	Possibilité d'acheminer un passager d'un point A vers un point B avec le minimum de correspondances, et ce à moindre coût. (Organisation de l'aviation civile internationale [OACI], 2013)
Décarbonisation	« Ensemble des mesures et techniques mises en place en vue de limiter l'empreinte carbone d'une entreprise, d'un secteur d'activité, d'un pays ou d'une économie, la décarbonisation s'opère en augmentant l'efficacité énergétique et en substituant une source d'énergie propre (c'est-à-dire n'entraînant pas d'émission de gaz à effet de serre, particulièrement de CO <sub>2</sub> ) aux hydrocarbures employés pour produire ou assurer un fonctionnement. » (Orygeen, s.d.)
<i>Drop in fuel</i>	Hydrocarbures liquides fonctionnellement équivalents aux carburants dérivés du pétrole. (Karatzos, McMillan et Saddler, s. d.)
Effet de serre	« L'effet de serre est un phénomène d'échauffement de la surface de la Terre et des couches basses de l'atmosphère, dû au fait que certains gaz de l'atmosphère absorbent et renvoient une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre, ce dernier compensant le rayonnement solaire qu'elle absorbe elle-même. » (Dictionnaire environnement, s.d.)
Effets non-CO <sub>2</sub>	Émissions de GES de l'aviation, excluant le CO <sub>2</sub> , qui contribuent également au réchauffement climatique. (Transport & Environment, 2017)

Équivalent CO <sub>2</sub>	Quantité émise de CO <sub>2</sub> qui provoquerait le même forçage radiatif, pour un horizon de temps donné, qu'une quantité émise d'un seul ou de plusieurs gaz à effet de serre. L'émission en équivalent CO <sub>2</sub> est obtenue en multipliant l'émission d'un gaz à effet de serre par son potentiel de réchauffement planétaire. (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2013)
Externalité négative	Activité de production ou de consommation d'un agent qui affecte le bien-être d'un autre sans qu'aucun des deux reçoive ou paye une compensation pour cet effet. » (Universalis, s.d.)
Forçage radiatif	« Variation du flux de rayonnement résultant (différence entre l'éclairement descendant et l'éclairement ascendant, exprimée en W/m <sup>2</sup> ), à la tropopause ou au sommet de l'atmosphère, due à une modification d'un agent externe du changement climatique, par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire. » (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2013)
Intensité carbonique	Quantité d'émissions de CO <sub>2</sub> émise par unité tel que le produit intérieur brut, ou l'utilisation d'énergie. (Programme des Nations unies pour l'environnement, 2018)
Mécanisme basé sur le marché	Outil servant à mettre en place des politiques environnementales à moindre coût et de manière plus flexible que les mesures réglementaires traditionnelles. Des exemples de MBM comprennent les systèmes d'échange de droits d'émission et la compensation carbone. (OACI, s. d.)
Pouvoir de réchauffement planétaire	Index présentant les effets combinés de différents gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère et leur efficacité relative à absorber le rayonnement infrarouge sortant. (Programme des Nations unies pour l'environnement, 2018)
Stratosphère	« Zone de l'atmosphère d'une planète située au-dessus de la troposphère et caractérisée par une faible croissance de la température avec l'altitude. (La stratosphère terrestre s'étend, en moyenne, entre 12 et 50 km d'altitude. Elle doit son nom à l'existence de courants essentiellement horizontaux. Elle renferme la quasi-totalité de l'ozone atmosphérique.) » ( <i>Larousse : dictionnaire encyclopédique</i> , s.d.)

Surface mouillée	Surface qui est en contact avec le flux d'air extérieur. (Wikipédia, 2019)
Syngaz	Gaz de synthèse, appelé « syngas » (pour <i>synthetic gas</i> ). Mélange de deux gaz combustibles : le monoxyde de carbone et l'hydrogène. (Connaissance des énergies, 2011)
Système de plafonnement et d'échanges	Système pour lequel une limite supérieure d'émissions est fixée et où les permis sont vendus aux enchères ou distribués gratuitement selon des critères spécifiques. Les pollueurs qui réduisent leurs émissions plus qu'ils ne le doivent peuvent obtenir des crédits qu'ils vendent à d'autres qui en ont besoin pour se conformer aux réglementations auxquelles ils sont soumis. (Programme des Nations unies pour le développement, s. d.)
<i>Tankering</i>	Remplissage maximal systématique, incitant les aéronefs à faire le plein d'essence dès leur entrée en territoires non taxés. (Seely, 2019)
Traînée	« Force résistante qu'exerce un fluide sur un objet lorsque le fluide ou l'objet sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. La force de traînée s'oppose au mouvement de l'objet et agit comme une force de frottement. » (Futura sciences, s.d.)
Troposphère	Couche de l'atmosphère la plus basse, variant entre 10 km et 20 km, dans laquelle la température baisse de manière inversement proportionnelle à l'altitude. (The new dictionary of cultural literacy, s. d.)

## INTRODUCTION

L'Homme a toujours éprouvé ce désir de voler. Depuis le premier vol des frères Wright, pionniers de l'aviation, en 1903, le secteur de l'aviation a connu une évolution fulgurante (Dignat, 2019). Les développements technologiques réalisés en temps de guerre ont contribué à transformer le secteur. L'invention du moteur à réaction, dans les années 1940, a révolutionné le transport aérien commercial en permettant de voler à des vitesses jamais atteintes auparavant (Encyclopædia Britannica, s.d.). Depuis, le nombre de passagers n'a cessé d'augmenter de même que les émissions de gaz à effet de serre (GES). Tous les 15 ans, on assiste à un doublement du trafic aérien (Chiambaretto, 2019, 8 mai) et selon les estimations de l'Association internationale du transport aérien (IATA), le nombre de voyageurs pourrait s'élever à près de huit milliards d'ici les 20 prochaines années. (Association internationale du transport aérien [IATA], 2018b) Les conséquences des émissions de GES, qui résultent de la combustion du carburant, font ainsi pression sur l'environnement, même si la performance des moteurs, en termes de consommation d'essence, s'est améliorée d'environ 70 % depuis les années 1960 (Domergue, 2009).

Dans le contexte de changements climatiques actuel, l'empreinte environnementale du secteur aérien génère des inquiétudes. En effet, selon les engagements de l'Accord de Paris, pour limiter le réchauffement climatique d'ici 2100, à 2 °C, voire 1,5 °C, les émissions de GES globales doivent rapidement chuter pour tendre vers la carboneutralité d'ici 2050 (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]), 2018). À l'heure actuelle, l'aviation civile est responsable d'environ 2 % de ces émissions (Programme des Nations unies pour l'environnement, 2018), mais en raison de l'augmentation du trafic aérien prévue, les émissions du secteur pourraient doubler, voire même tripler, d'ici 2050 selon les projections de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (Organisation de l'aviation civile internationale [OACI], 2019). Comment ainsi arrimer les objectifs de réduction de l'Accord de Paris à l'importante croissance prévue du trafic aérien? Comment faire en sorte que cette croissance se fasse de façon durable?

L'industrie aéronautique se déclare mobilisée dans la lutte contre les changements climatiques depuis déjà plusieurs années (Agence France-Presse, 2019). Il faut dire que les coûts en carburant représentent une proportion importante des dépenses des compagnies aériennes (Agence internationale de l'énergie renouvelable [IRENA], 2017). Ainsi, les intérêts économiques rencontrent les intérêts environnementaux, ce qui incite le secteur à réduire sa consommation de carburant et par le fait même son impact sur l'environnement (Domergue, 2009). De façon plus formelle, c'est à la suite du protocole de Kyoto, en 1997, que l'OACI, une institution spécialisée des Nations unies, a hérité de cette responsabilité environnementale. C'est donc dans cette optique que l'industrie a adopté, il y a quelques années, des cibles ambitieuses. L'OACI vise une réduction nette de 50 % des émissions d'ici 2050 en référence à 2005, la stabilisation des émissions de CO<sub>2</sub> à partir de 2020 grâce à une croissance neutre et une

amélioration annuelle du rendement du carburant de 2 %. Pour atteindre ces objectifs, l'industrie a élaboré une stratégie basée sur un « panier de mesures ». Ce faisant, elle est la première à mettre en place un plan d'action pour limiter ses impacts sur les changements climatiques à l'échelle internationale. Les mesures phares de cette stratégie reposent sur la tarification du carbone et le développement des carburants alternatifs. Les progrès technologiques ainsi que l'amélioration de la gestion du trafic aérien font également partie de la stratégie. Bientôt, on assistera au déploiement du programme CORSIA qui devrait servir à atteindre la croissance neutre dès 2020 en permettant aux compagnies aériennes de compenser leurs émissions de CO<sub>2</sub> excédentaires au seuil de référence. (OACI, 2019d) Cette dernière mesure est cependant bien critiquée : on remet en question son efficacité à induire de véritables réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> en l'absence de critères d'éligibilité clairs pour l'achat des crédits de compensation (Timperley, 2019, 4 février; Agence environnementale de l'Allemagne, 2019). Du côté du développement des carburants alternatifs, la disponibilité de la matière première, les coûts de production ainsi que les enjeux éthiques sont au cœur du débat (IRENA, 2017; El Takriti, Pavlenko et Searle, 2017).

Le Canada, quant à lui, n'est pas épargné de cette croissance du secteur aérien. Effectivement, Transport Canada estime que le trafic aérien national et international aurait augmenté respectivement de 3 % et 4,5 % chaque année depuis 2012. (Transport Canada, 2012) Il est vrai qu'au Canada, le transport aérien joue un rôle important dans la vie des citoyens. Il sert à approvisionner des régions éloignées, il contribue au commerce national et international et permet à la population d'être connectée à travers le vaste territoire (Environnement et Changement climatique Canada [ECCC], 2017a). Pour limiter les effets sur l'environnement, le Canada possède un plan d'action volontaire, depuis 2012, qui vise à réduire les émissions de GES provenant de l'aviation civile (Transport Canada, 2012). On assiste aussi au déploiement de la taxe carbone à l'échelle du pays via l'implantation du Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (CPC). La Norme sur les combustibles propres (NCP), également sous le chapeau du CPC, devrait entrer prochainement en vigueur. (ECCC, 2019a) Toutefois, l'applicabilité de la NCP au transport aérien domestique reste encore nébuleuse et le transport aérien international, lui, échappe pour le moment au CPC et à la NCP. On peut donc se demander si les mesures mises en place par le gouvernement, dans le domaine de l'aviation civile, sont réellement suffisantes pour réduire les émissions de GES du secteur.

L'objectif principal de cet essai est d'identifier des pistes de solutions ou d'améliorations, à l'échelle internationale et nationale, pour que le secteur aérien puisse réduire son empreinte carbone. Cette analyse portera surtout sur la tarification du carbone et le développement des carburants alternatifs durables puisque, selon l'industrie, ce sont les moyens les plus prometteurs pour atteindre d'importantes réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> (OACI, 2019d). Par ailleurs, cet essai permettra d'établir un portrait de l'aviation civile, dans une perspective environnementale, autant au Canada qu'à l'international, en plus d'évaluer les cibles et la stratégie de l'industrie pour en faire une critique.



L'essai comporte sept chapitres. Le premier chapitre présente le secteur de l'aviation civile, de manière globale, dans le contexte des changements climatiques. Les conséquences de l'industrie sur l'environnement sont énoncées de même que les efforts qui ont été déployés dans les dernières années pour les minimiser. Le chapitre 2 expose les événements importants ayant marqué le secteur de l'aviation civile en matière d'environnement ce qui permettra au lecteur d'acquérir une meilleure compréhension du cadre réglementaire et politique de l'industrie. Le chapitre 3 aborde l'aviation civile à l'échelle du Canada en présentant le portrait du secteur et de ses émissions de GES. Les cibles environnementales du pays ainsi que les moyens utilisés pour les atteindre sont également énoncés. Le chapitre 4 a pour but d'évaluer les cibles de l'industrie. Pour ce faire, elles sont mises en perspective par rapport à celles de l'Accord de Paris en plus d'être comparées aux cibles du transport maritime, ferroviaire et routier. Le sujet de l'essai étant très actuel, de nombreuses données et études récentes sont utilisées.

Le cœur de l'essai se compose des chapitres 5 et 6 qui portent respectivement sur la tarification du carbone et sur le développement de carburants alternatifs durables, aussi appelés *Sustainable Aviation Fuel* (SAF). Le terme SAF est utilisé tout au long de l'essai puisque c'est l'expression courante la plus employée dans l'industrie aérienne. À travers le chapitre 5, l'applicabilité de la taxe carbone et du marché du carbone au secteur aérien est évaluée. Au chapitre 6, l'évolution des différents types de biocarburants est présentée ainsi qu'un survol de nouvelles technologies permettant la production de SAF. L'essai se conclut par le chapitre 7 qui regroupe des recommandations adressées à l'OACI et au gouvernement du Canada afin de réduire l'empreinte carbone du secteur aérien.

## 1. AVIATION CIVILE ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le transport aérien est le moyen le plus rapide pour se rendre à destination, mais il est aussi l'un des plus dommageables à l'environnement en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>. La naissance de mouvements tels que le *Flygskam* (honte de prendre l'avion), né en Suède, amène certains individus à se remettre en question sur le sujet (Lyn Pesce, 2019, 21 juin). Quel est l'impact réel du transport aérien sur l'environnement? Faut-il limiter ses déplacements en avion? Ce chapitre présente l'essor du trafic aérien depuis les dernières décennies ainsi que ses conséquences sur l'environnement. Le portrait des émissions GES du secteur est ensuite exposé tout comme certains progrès technologiques réalisés pour les réduire. Par la suite, les principaux défis qui attendent l'aviation civile sont abordés.

### 1.1 Évolution de l'aviation civile à l'échelle internationale

Depuis les années 1970, le trafic aérien a connu une augmentation exponentielle (figure 1.1). En effet, tous les 15 ans, le secteur voit son nombre de passagers doubler (Schulz, 2018). Cette demande pour le transport aérien est mesurée par l'industrie en *revenue passenger kilometre* (RPK) qui correspond au nombre de passagers payants multipliés par la distance parcourue (Aeroflot, s. d.). En 2017, ce nombre de voyageurs s'élevait à plus de quatre milliards (Air Transport Action Group [ATAG], 2018a) et le IATA estime qu'il pourrait bien doubler, d'ici 2037, pour atteindre huit milliards (IATA, 2018b). De nos jours, l'industrie compte à travers le monde près de 1300 compagnies aériennes, 3900 aéroports et 31 700 avions commerciaux en service (ATAG, 2018a). Le secteur aérien est en pleine expansion et il n'est pas près de s'arrêter.

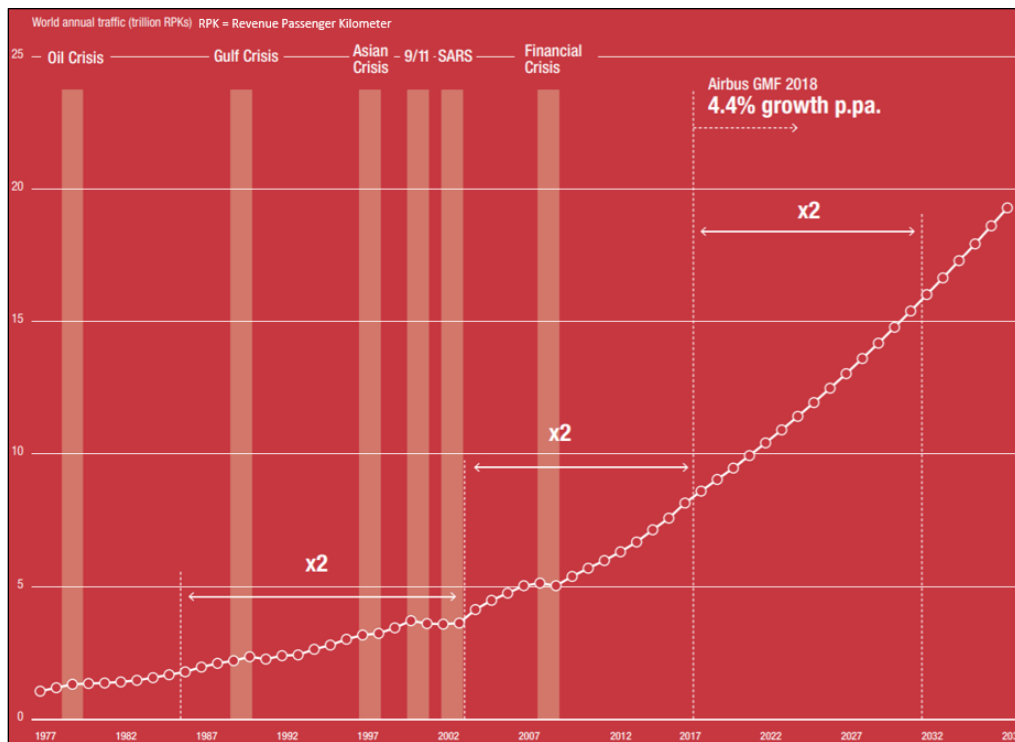


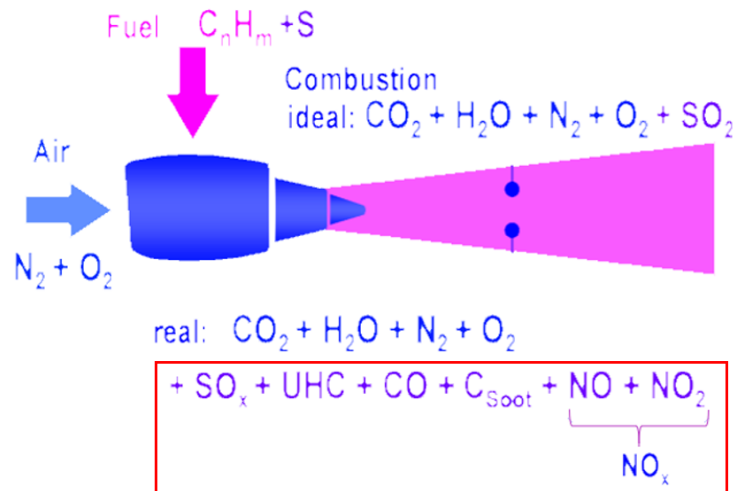
Figure 1.1 : Tendance du trafic aérien (1977-2037) (tiré de : Airbus, 2018)

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette croissance dont le développement des pays émergents, la diminution des prix des billets d'avion et l'augmentation de la population mondiale. Une réduction de la pauvreté, un exode rural ainsi qu'une augmentation de la classe moyenne sont des éléments qui accompagnent le développement des pays émergents, comme la Chine, et qui participent ainsi à la hausse du trafic aérien (Sia Partners, 2016). Par ailleurs, le prix des billets d'avion a diminué d'environ 60 % depuis les années 1970, les rendant plus abordables (Conseil international des aéroports [ACI] et al., 2017). L'apparition des compagnies *low cost*, au début des années 2000, telles que *Ryanair* et *Easyjet*, a aussi rendu le transport aérien plus accessible qu'il ne l'était auparavant. Pour rester compétitives, les autres compagnies aériennes ont été obligées de s'ajuster en offrant également des billets d'avion à moindre coût (Sia Partners, 2016). L'augmentation du tourisme impacte aussi directement l'achalandage des aéroports. Par exemple, en 2017, 57 % des touristes internationaux ont utilisé l'avion pour se rendre à destination. Bref, tous ces facteurs contribuent à la démocratisation de ce mode de transport et expliquent l'augmentation annuelle du trafic aérien d'environ 5 % (ATAG, 2018a).

Le développement des activités aériennes est habituellement perçu de façon positive, car il est intimement lié au développement économique mondial comme il est aussi possible de le constater à la figure 1.1. Les variations du secteur sont en effet sensibles aux conjonctures économiques et suivent, de manière générale, les fluctuations du produit intérieur brut (Dostaler, Sabbane, Stein et Tomberlin, 2008). Cela peut s'expliquer par le fait que l'industrie aérienne supporte un total de 65,5 millions d'emplois et génère des retombées économiques (directes et indirectes) d'environ 3,5 milliards de dollars canadiens ce qui équivaut à 3,6 % du produit intérieur brut mondial. (Sia Partners, 2016; ATAG, 2018a). L'essor du secteur aérien est donc lié au développement économique. Toutefois, l'augmentation des activités aériennes provoque également des effets néfastes sur l'environnement qui sont détaillés à la section suivante.

## **1.2 Impacts sur l'environnement**

Idéalement, la combustion de carburant ne produit principalement que du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), mais en raison des imperfections de ce monde, d'autres composants indésirables sont aussi formés comme le démontre l'encadré rouge de la figure 1.2. Parmi eux se retrouvent des hydrocarbures imbrûlés, du monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ), des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), des oxydes de soufre ( $\text{SO}_x$ ) et des particules en suspension comme la suie et les sulfates. Les hydrocarbures imbrûlés et  $\text{CO}$  sont les résidus d'une combustion incomplète alors que les  $\text{NO}_x$  résultent de l'interaction entre le  $\text{N}_2$  et l' $\text{O}_2$ . Les  $\text{SO}_x$ , quant à eux, proviennent du soufre présent dans le carburant (Service technique de l'aviation civile [STAC], 2019)



**Figure 1.2 : Contaminants résultant de la combustion de carburant** (tiré de : STAC, 2019)

L'aviation civile altère l'environnement de différentes manières, que ce soit par le bruit ou le rejet de polluants dans l'atmosphère. Ces effets se font sentir à la fois à l'échelle locale, régionale et mondiale. Outre les rejets de  $CO_2$ , un des principaux GES, d'autres phénomènes, dits « effets non- $CO_2$  », contribuent aussi au réchauffement climatique et c'est pour considérer l'ensemble de ces conséquences sur le climat que la notion de forçage radiatif (FR) est utilisée. Les diverses conséquences de ces contaminants sur l'environnement sont abordées dans les sections subséquentes.

### 1.2.1 Pollution sonore

Tout bruit jugé indésirable est considéré comme de la pollution sonore. Il est important de souligner que cette définition laisse place à interprétation et que cela peut ainsi varier d'un individu à un autre. (OACI, 2016b) La pollution sonore, mesurée en décibels (dBA), associée au transport aérien, provient en partie de la friction entre l'air et l'enveloppe de l'avion. Une autre proportion du bruit provient des pièces rotatives des moteurs et de l'air chaud qui en est expulsé. (Gatwick airport, s. d.) Cette nuisance représente un enjeu important de la santé publique puisqu'elle affecte de façon négative la qualité de vie et la santé des citoyens en périphérie des aéroports. (OACI, 2016b).

Plusieurs études ont démontré qu'une exposition au bruit peut générer des troubles du sommeil, de l'irritabilité et des troubles de l'apprentissage chez les enfants. À plus long terme, cette exposition peut augmenter le risque de crise cardiaque, de haute pression et d'accident vasculaire cérébral. (Aviation environment federation, 2016) Le bureau régional de l'Organisation mondiale de la santé pour l'Europe (2018) recommande une exposition moyenne au bruit inférieure à 45 dBA le jour et à 40 dBA la nuit pour éviter les effets néfastes sur la santé (Organisation mondiale de la santé [OMS], 2018). Pour référence, le niveau sonore d'une conversation normale se situe autour de 60 dBA.

Plusieurs facteurs peuvent influencer le niveau de bruit dont l'intensité du trafic aérien, les routes utilisées lors de l'approche ainsi que les manœuvres en vol. (Civil Air Navigation Services Organisation et ACI, 2015) De façon générale, les aéroports surveillent leur niveau de bruit grâce à des appareils de surveillance placés à des endroits stratégiques qui leur permettent de s'assurer qu'ils opèrent à l'intérieur des limites de bruits. Il existe en effet des règlements stricts. Certains aéroports sont même tenus de respecter des couvre-feux afin d'éviter de minimiser les troubles du sommeil de la population. (OACI, 2016b)

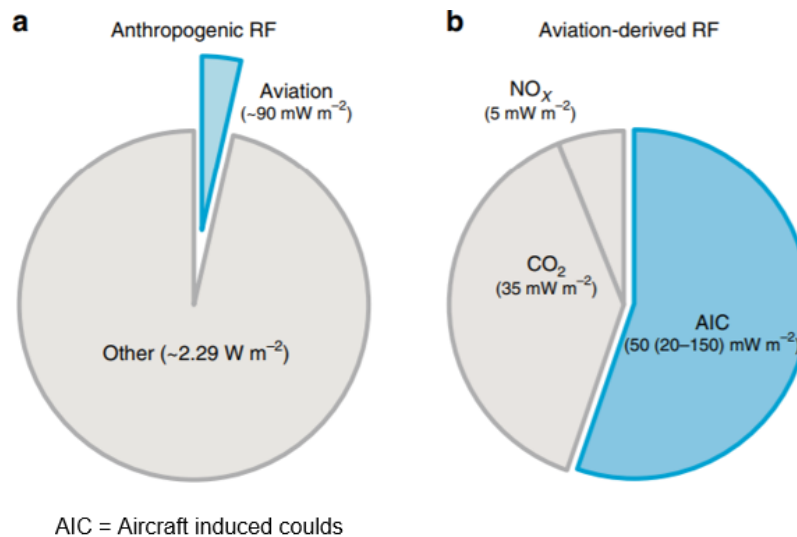
### **1.2.2 Qualité de l'air**

Les contaminants rejetés dans l'air proviennent de la combustion du carburant, tel que mentionné précédemment, mais aussi des activités aéroportuaires. Les polluants les plus dommageables pour la santé sont les  $\text{NO}_x$  et les particules en suspension. À basse altitude, le monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ) est rapidement oxydé et transformé en dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), un composant pouvant causer une inflammation des poumons. La présence de  $\text{NO}_x$  dans l'air permet aussi la formation, par réaction chimique, d'un polluant supplémentaire : l'ozone. Même si à haute altitude l'ozone permet de se protéger des rayons ultraviolets du soleil, à basse altitude, il peut engendrer des troubles respiratoires tels que l'emphysème, l'asthme, la bronchite et même diminuer les fonctions pulmonaires. (Agence européenne de la sécurité aérienne [EASA], 2019a)

Les particules en suspension, aussi appelée aérosols ou *particulate matter*, sont des particules ultrafines solides ou liquides possédant un diamètre entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ . En raison de leur petite taille, elles peuvent pénétrer les barrières naturelles humaines et trouver refuge dans les poumons ou le sang. Elles peuvent de même générer des inflammations ou agir comme transporteur pour certaines substances toxiques. Certaines particules en suspension, comme la suie, dégradent la qualité de l'air en altérant la visibilité ou en participant à la formation de smog dans les villes. (EASA, 2019b)

### **1.2.3 Changements climatiques et forçage radiatif**

Le forçage radiatif, exprimé en watts par mètre carré, se définit comme le changement d'équilibre entre les radiations sortantes et entrantes de l'atmosphère. Des valeurs positives de FR supposent un réchauffement alors que des valeurs négatives supposent un refroidissement du climat. Autrement dit, lorsque l'énergie des radiations entrantes est supérieure aux radiations sortantes, l'atmosphère se réchauffe, ce qui correspond à un FR positif. L'aviation civile est responsable d'une part du FR total à l'origine des changements climatiques tel qu'il est présenté à la figure 1.3. Cependant, à l'intérieur de cette proportion, certains phénomènes, autres que les émissions de  $\text{CO}_2$ , contribuent aussi au réchauffement climatique. Il donc est essentiel d'avoir recours à la notion de FR si on souhaite saisir pleinement l'impact du transport aérien sur le climat. (STAC, 2016; Kärcher, 2018)



**Figure 1.3 : Constituants du forçage radiatif relatif au secteur aérien** (tiré de : Kärcher, 2018)

Les paragraphes suivants présentent les différents éléments affectant le FR du secteur aérien afin d'en saisir leur origine et leur impact sur le réchauffement climatique.

#### *NO<sub>x</sub>*

En réagissant avec d'autres éléments chimiques présents dans l'atmosphère, les oxydes d'azote favorisent la formation d'ozone qui amplifierait l'effet de serre. D'un autre côté, les NO<sub>x</sub> permettent aussi la destruction du méthane (CH<sub>4</sub>), un gaz à effet de serre qui possède un pouvoir de réchauffement planétaire plus puissant que le CO<sub>2</sub> et une durée de vie plus courte. (STAC, 2016) Ces deux effets sur le climat ont ainsi tendance à se contrebalancer. Il est difficile de quantifier les impacts des oxydes d'azote en termes de FR puisque les composés issus des réactions chimiques, l'ozone et le méthane, possèdent des durées de vie courtes qui rendent leurs concentrations dans l'atmosphère non uniformes. Celles-ci varient selon différents facteurs comme la position géographique et la quantité de NO<sub>x</sub> déjà présent dans l'air. Ces spécificités sont ainsi difficiles à modéliser. (OACI, 2016b) Néanmoins, il est possible d'estimer sa contribution au FR total tel qu'illustrée à la figure 1.3.

#### *Traînées de condensation et cirrus*

Les moteurs d'avion provoquent l'apparition de traînées de condensation linéaires par le rejet d'air chaud et humide. Par la suite, selon les conditions atmosphériques, celles-ci peuvent se transformer en grands développements de cirrus qui ne peuvent être distingués des cirrus naturels. L'apparition de ces traînées et nuages, aussi appelés *aircraft induced clouds* (AIC), contribue également à réchauffer la Terre. L'exactitude concernant l'effet cumulatif de ces phénomènes sur le climat reste encore à approfondir puisque ceux-ci sont localisés et dépendent grandement des conditions atmosphériques. (Boucher et al., 2013)

### *Aérosols*

Les aérosols émis par l'activité aérienne servent aussi de précurseurs à l'apparition des AIC, et ce même longtemps après le passage de l'aéronef. Ils participent ainsi à l'augmentation de la nébulosité et contribuent au FR positif (STAC, 2016). Grâce à leurs propriétés optiques, certains aérosols, tels que la suie, ont le pouvoir d'absorber le rayonnement solaire et participent ainsi à réchauffer l'atmosphère. D'autres, comme les sulfates, réfléchissent bien la lumière et possèdent un pouvoir refroidissant. Les aérosols peuvent aussi modifier les propriétés microphysiques des nuages, leur persistance et leur hauteur. (Planète viable, 2012) À l'heure actuelle, il n'y a cependant pas de consensus scientifique sur le signe du FR engendré par ce phénomène. Il n'a donc pas été considéré à la figure 1.3. Toutefois, cette valeur pourrait bien être de signe opposé à la valeur associée au AIC et même du même ordre de grandeur. Il existe ainsi une incertitude importante associée à l'impact des aérosols sur le réchauffement climatique. (Kärcher, 2018)

### *Vapeur d'eau*

La vapeur d'eau est présente de façon naturelle et abondante dans l'air. Celle-ci a d'ailleurs contribué à l'effet de serre naturel de la Terre, tout comme le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>, ce qui a permis de maintenir une température moyenne propice à la vie de 15 °C. Or, les activités anthropiques ont déséquilibré la composition de ces gaz responsables de l'effet de serre naturel. Depuis, leurs concentrations ne cessent d'augmenter provoquant ainsi le réchauffement climatique actuel. (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2019)

Lors de la combustion d'un moteur, de la vapeur d'eau est rejetée dans l'air. Celle-ci contribue au réchauffement climatique tel que mentionné précédemment. Cet effet est toutefois minime, car la majorité de l'eau est rejetée dans la troposphère et est ainsi évacuée rapidement sous forme de précipitations. Cet effet n'a pas été représenté à la figure 1.3, car il a été jugé marginal. (Kärcher, 2018) De plus, selon la norme internationale ISO 14064 régissant les inventaires de GES, la vapeur d'eau n'est pas reconnue comme un GES puisqu'il est difficile de déterminer quelle proportion du réchauffement climatique est attribuable à la vapeur d'eau d'origine anthropique seulement. (Organisation internationale de normalisation [ISO], 2018)

### *Forçage radiatif total*

En considérant tous ces phénomènes, en 2011, la contribution du secteur aérien aux changements climatiques a atteint un FR de 4 % (Kärcher, 2018). En raison de l'augmentation du trafic aérien, il est légitime de supposer que cette proportion ait elle aussi augmenté. L'impact réel du secteur aérien sur les changements climatiques est donc plus important qu'on ne le pense et il importe de souligner qu'il ne se limite pas qu'aux émissions de CO<sub>2</sub>.

### **1.3 Portrait des émissions de GES du secteur**

En 2017, les émissions mondiales de GES ont atteint 53,5 gigatonnes (Gt). (Programme des Nations unies pour l'environnement, 2018) Le secteur des transports, quant à lui, s'élevait à près de 8 Gt. (Agence internationale de l'énergie, 2016)

L'aviation civile est responsable d'environ 2,5 % des émissions de GES mondiales. (Programme des Nations unies pour l'environnement, 2018) En 2018, 895 mégatonnes (Mt) d'équivalent CO<sub>2</sub> ont été émises mondialement par l'industrie aérienne, ce qui représente 12 % des émissions liées au transport (ATAG, 2018b). C'est également, le mode de transport qui possède le plus d'impact par kilomètre en termes d'émissions de GES. En effet, l'aviation civile émet annuellement autant de GES que l'Allemagne (ATAG, 2018a).

D'ici 2050, les émissions de CO<sub>2</sub> pourraient dépasser le cap des 2500 Mt. (OACI, 2016b) Il est légitime de supposer que les émissions devraient augmenter proportionnellement au trafic aérien si aucune initiative de réduction n'est entreprise. L'industrie travaille toutefois sur plusieurs fronts pour minimiser son empreinte carbone. D'ailleurs, de nombreux progrès au cours des dernières décennies ont été réalisés.

### **1.4 Aperçu des progrès réalisés en matière de réduction d'impacts environnementaux**

Bien que les effets de l'activité aérienne soient toujours grandissants, il faut reconnaître que le secteur a réalisé certaines améliorations en matière de réduction d'impacts environnementaux.

#### **1.4.1 Technologies liées aux aéronefs**

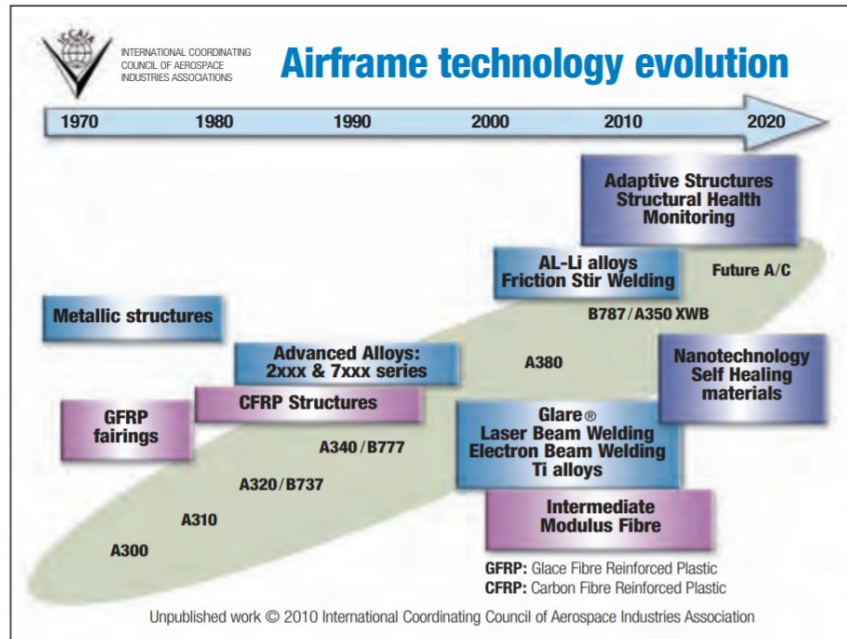
Il est important de saisir qu'en aviation, tout progrès, en termes de performance, contribue habituellement à diminuer la consommation de carburant dans l'objectif principal de minimiser les coûts de l'exploitant. Malgré tout, cela permet également de réduire les émissions de GES et donc l'empreinte environnementale. (OACI, 2010) De grands progrès technologiques ont d'ailleurs eu lieu depuis les premiers avions commerciaux. Effectivement, les nouveaux aéronefs sont 75 % plus silencieux (ATAG 2018a) et utilisent jusqu'à 80 % moins de carburant que dans les années 1960 (OACI, 2010). Pour améliorer la performance des avions, plusieurs éléments peuvent être optimisés dont le poids, l'aérodynamisme et la performance même des moteurs.

##### *Réduction du poids*

Dans le domaine de l'aéronautique, le poids est un facteur déterminant puisqu'il est directement lié à la consommation de carburant. La migration des alliages d'aluminium vers les matériaux composites pour la fabrication des fuselages d'avions, commencée dans les années 1990, a permis de réduire considérablement le poids des aéronefs tel qu'on peut le constater à la figure 1.4. Par exemple, la moitié



du fuselage du *Dreamliner 787* est conçu en matériaux composites (Brady, 2017). Pour l'Airbus A220, initialement le *CSeries*, cette proportion atteint 40 % (Airbus, 2019).



**Figure 1.4 : Évolution technologique des modèles d'avions** (tiré de : OACI, 2010)

Les progrès en matière de procédés de fabrication ont aussi contribué en ce sens (figure 1.4). En développant des technologies avancées de soudure, telles que le faisceau électron et le rayon laser, il a été possible de limiter le nombre de rivets utilisés pour assembler certaines composantes réduisant ainsi le poids. (OACI, 2010)

Le passage aux commandes de vols électriques a également eu un impact significatif sur le poids des avions. À la base, le contrôle des avions était effectué de façon mécanique et hydraulique. Ces équipements nécessitaient de relier physiquement la cabine de pilotage aux surfaces de contrôle de l'avion à l'aide de câbles, de gouvernes et de pompes hydrauliques. En revanche, les commandes électriques ne nécessitent que des fils, ce qui a ainsi permis de réduire considérablement le poids. (Garg, Islam Linda et Chowdhury, 2013, décembre)

### *Aérodynamisme*

La performance aérodynamique d'un avion est également très importante puisqu'elle influence la consommation de carburant. Effectivement, la friction entre l'air et certaines surfaces exposées, comme le fuselage et les ailes, provoque une résistance qu'on appelle la résistance de l'air. Cette force, qui s'oppose à l'avancement de l'avion, se nomme la traînée. En minimisant cette force, il est ainsi possible de réduire la consommation de carburant et ainsi ses émissions de CO<sub>2</sub>. La traînée peut être réduite de plusieurs façons comme en diminuant la superficie des surfaces exposées à l'air, dites surfaces

mouillées. Des améliorations au design des aéronefs ont aussi permis d'optimiser la façon dont l'air s'écoule sur ces surfaces pour minimiser les turbulences qui augmentent la traînée (OACI, 2010). Par exemple, la forme des fuselages et des ailes a beaucoup évolué depuis les années 1960, ce qui a permis de gagner en efficacité aérodynamique.

#### *Performance des moteurs*

Par le développement de nouvelles technologies et de nouveaux designs, les fabricants de moteurs peuvent réduire la consommation de carburant. À titre d'exemple, l'atteinte d'une température de combustion plus élevée permet d'obtenir de plus grands ratios de pressions entre l'entrée et la sortie des moteurs, ce qui améliore leur efficacité. (OACI, 2010)

La recherche et le développement sur les carburants alternatifs durables pourraient également améliorer la performance des moteurs en matière d'émissions de GES. Le premier vol expérimental utilisant un biocarburant à proportion de 50 % a décollé de Auckland en Nouvelle-Zélande en décembre 2008 (Brimont, 2017). Un an après, l'OACI a tenu la première conférence sur l'aviation et les carburants alternatifs. Elle a également lancé la plateforme *Global framework on aviation alternative fuels* qui permet à la communauté d'échanger en ligne des informations et documents concernant les progrès réalisés sur le développement de ces carburants. (OACI, 2016b) En 2018, cinq procédés sont certifiés jusqu'à proportion de 50/50 avec le kérosène conventionnel. Cependant, un seul procédé est techniquement mature et commercialisé. De plus, seulement cinq aéroports possèdent un approvisionnement régulier en biocarburant (Bergen, Brisbane, Los Angeles, Oslo et Stockholm). (Le Feuvre, 2019)

#### **1.4.2 Gestion du trafic aérien et des opérations**

La façon dont les avions sont opérés en vol et au sol (ATM : *air traffic management*) influence leur consommation de carburant. Il est donc possible, en optimisant ces opérations, de réduire les impacts environnementaux. Par exemple, entre 1997 et 2005, le *reduced vertical separation minima* a été déployé partout à travers le monde. Ce programme consistait à réduire l'espace vertical minimal entre deux niveaux de vol pour les altitudes allant d'environ 0,3 à 0,6 kilomètres (km). Cette mesure avait deux objectifs : augmenter la capacité de vol et permettre aux opérateurs de rejoindre l'altitude de croisière la plus efficace en termes de consommation de carburant. (Sky brary, 2015) Ce programme a permis l'introduction de six niveaux de vol supplémentaires ainsi qu'une réduction de 5 % des émissions de GES. (OACI, 2016b)

Au Royaume-Uni, en 2014, une campagne visant à augmenter les opérations en descente continue (CDO) a été lancée. Lorsqu'un avion approche pour l'atterrissage, il est possible qu'il réalise cette descente de façon graduelle et continue au lieu de descendre par paliers (figure 1.5). C'est ce qu'on appelle CDO, à ne pas confondre avec les approches en descente continue. Ces dernières sont réalisées

à partir d'une altitude d'environ 1,8 km alors que les CDO entament la descente dès l'altitude de croisière qui se situe entre 9,1 km et 12,2 km. (OACI, 2016b)









**Figure 1.5 : Opération en descente continue** (tiré de : OACI, 2016b)

Ces manœuvres servent surtout à minimiser la pollution sonore, c'est pourquoi cette campagne a été lancée dans les aéroports britanniques où un important problème de bruit persistait. Cependant, les CDO permettent aussi de réduire la consommation de carburant. Effectivement, au Royaume-Uni, une augmentation des CDO de 5 % peut mener à des économies d'environ 10 000 tonnes de CO<sub>2</sub>. En 2015, leur pratique avait augmenté de 77 %. (OACI, 2016b)

Un autre exemple de projets visant à améliorer la gestion du trafic aérien est l'initiative Ciel unique européen lancé en 2004 par la Commission européenne. Ce projet a pour objectif d'harmoniser la gestion du trafic aérien du territoire pour combler les besoins futurs en matière de capacité, améliorer la sécurité et l'efficacité des vols et réduire les impacts environnementaux. L'initiative repose sur quatre piliers : le plan institutionnel, opérationnel, technologique et de contrôle. (Sky brary, 2019; Commission européenne, 2017)

Associé à l'aspect technologique du Ciel unique européen, on retrouve le projet *Single European Sky ATM Research* communément appelé SESAR. Il vise à améliorer la performance de la gestion du trafic aérien en modernisant et en harmonisant le système actuel par le déploiement de solutions technologiques et opérationnelles innovantes. Le projet a été divisé en trois phases : la phase de définition (2005-2008), de développement (2008-2013) et de déploiement (2014-2020 et plus). La première phase a mené à l'élaboration du plan de modernisation du trafic aérien appelé *European ATM Master plan*. (Sky brary, 2019; Commission européenne, 2017) Les ambitions du Ciel unique européen et SESAR sont représentées à la figure 1.6. Le première phase de recherche et développement, SESAR 1, lancée de 2008 à 2016, a permis d'amener plus de 60 solutions à maturité. (SESAR Joint Undertaking, 2019)

Key performance area	SES High-Level Goals vs. 2005	Key performance indicator	SESAR ambition vs. baseline 2012	
			Absolute saving	Relative saving
 Cost efficiency: ANS productivity	Reduce ATM services unit cost by 50% or more	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gate-to-gate direct ANS cost per flight</li> <li>- Determined unit cost for en-route ANS*</li> <li>- Determined unit cost for terminal ANS*</li> </ul>	EUR 290-380	30-40%
 Operational efficiency	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuel burn per flight (tonne/flight)</li> <li>• Flight time per flight (min/flight)</li> </ul>	4-8 min 0.25-0.5 tonne	3-6 % 5-10 %
 Capacity	Enable 3-fold increase in ATM capacity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Departure delay (min/dep)</li> <li>- En-route air traffic flow management delay*</li> <li>- Primary and reactionary delays all causes</li> <li>• Additional flights at congested airports (million)</li> <li>• Network throughput additional flights (million)</li> </ul>	1-3 min  0.2-0.4 (million) 7.6-9.5 (million) Additional flights, not saving	10-30 %  5-10 % <sup>1</sup> 80-100 % <sup>2</sup>
 Environment	Enable 10 % reduction in the effects flights have on the environment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> emissions (tonne/flight)</li> <li>- Horizontal flight efficiency (actual trajectory)*</li> <li>- Vertical efficiency</li> <li>- Taxi-out phase</li> </ul>	0.79-1.6 tonne	5-10 %
 Safety	Improve safety by factor 10	• Accidents with ATM contribution	No increase in accidents	Improvement by a factor 3-4
 Security	-	• ATM related security incidents resulting in traffic disruptions	No increase in incidents	

\* Targeted by the Performance Scheme

<sup>1</sup> Additional flights that can be accommodated at congested airports, representing 5-10 % of flights at congested airports (~31 % of 14,4 (million) flights in 2035).

<sup>2</sup> Additional traffic accommodated in 2035 in comparison with 2012 and associated with ANSP productivity gains, enabled by SESAR. Note: Numbers are rounded.

**Figure 1.6 : Ambitions de SESAR relatives aux objectifs du Ciel unique européen** (tiré de : Commission Européenne, 2017)

### 1.4.3 Normes et réglementation

L'OACI a adopté plusieurs normes et pratiques recommandées internationales, afin de réguler et harmoniser la gestion du transport aérien international. (International federation of air traffic controller's association, 2017) Certaines d'entre elles visent directement à limiter les conséquences sur l'environnement comme celle concernant la pollution sonore, entrée en vigueur en 1973. Cette norme établissait une limite de bruit, pour les aéronefs, proportionnelle à leur masse maximale au décollage, considérant que les avions plus lourds génèrent davantage de bruit. Depuis, en raison des progrès technologiques liés aux moteurs et aux aéronefs, la limite de la norme a pu être revue à la baisse. (OACI, 2016b) L'effet cumulatif, c'est-à-dire le fait qu'un plus grand nombre d'aéronefs engendrent plus de bruit, n'est toutefois pas pris en compte par la norme.

Une autre norme concernant la qualité de l'air a également été adoptée par l'OACI en 1981 pour réguler certaines émissions (NO<sub>x</sub>, CO et hydrocarbures). Récemment, une attention particulière a été portée aux particules en suspension pour leurs impacts sur la santé et le réchauffement climatique. D'ailleurs, une nouvelle norme en matière d'émissions de particules en suspension « non volatiles » (nvPM : *non-volatile particulate matter*), dont la suie, entrera en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2020 et s'appliquera à tous les moteurs fabriqués à partir de ce moment. (OACI, 2016b)

En somme, l'aviation a bien évolué depuis les années 1950. Les progrès technologiques ont permis de rendre les aéronefs que l'on connaît de nos jours plus performants, sécuritaires et confortables. Cependant, ces améliorations technologiques et opérationnelles ne sont pas suffisantes pour contrebalancer l'augmentation du trafic aérien. Il en résulte ainsi des effets nuisibles sur le climat. Comment l'industrie évoluera-t-elle? Quels sont les défis qui l'attendent dans un futur proche?

## 1.5 Quel avenir pour le secteur aérien?

Les prévisions sont sans équivoque. Le trafic aérien devrait connaître une expansion fulgurante dès 2030 avec un doublement du nombre de passagers. D'autres facteurs, tels que le contexte politique et les progrès technologiques, influenceront le développement du secteur. Dans les années à venir, l'aviation civile devrait subir une transformation en plus de faire face à plusieurs défis tels que discutés ci-dessous.

### 1.5.1 Émergence des pays en développement

En 2018, l'Asie-Pacifique représentait près de 36 % du trafic aérien et cette proportion devrait passer à 42 % dans les 20 prochaines années (Chiambaretto, 2019, 8 mai). On devrait ainsi assister à un déplacement global du marché aérien vers l'Est tel que le rapporte la figure 1.7. La croissance économique et démographique de ces pays sont des facteurs déterminants qui expliquent ce transfert de marché. (IATA, 2018b)

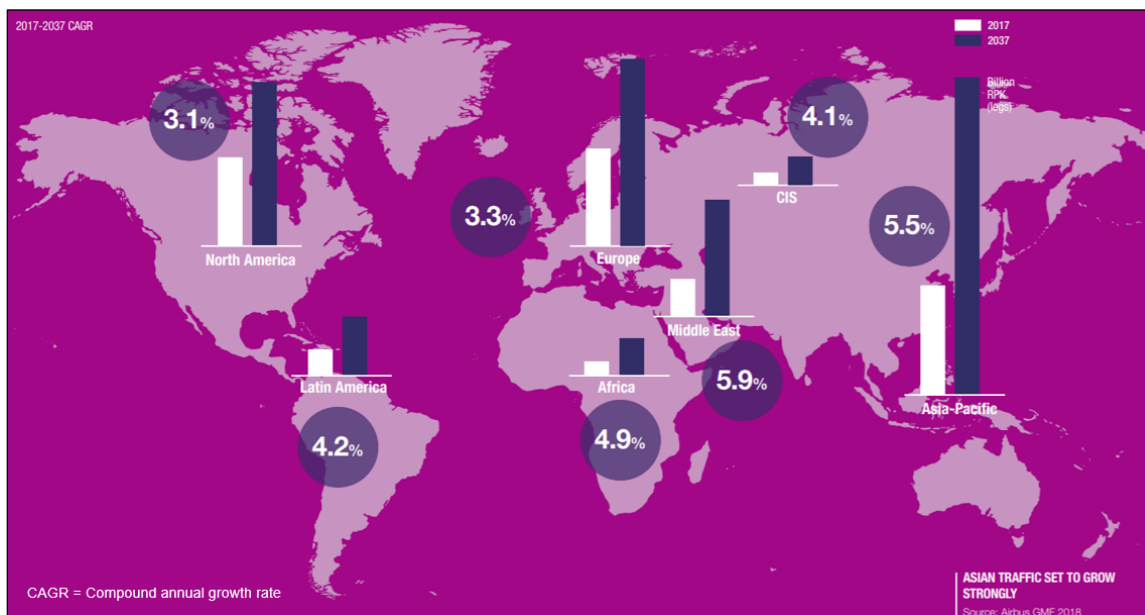
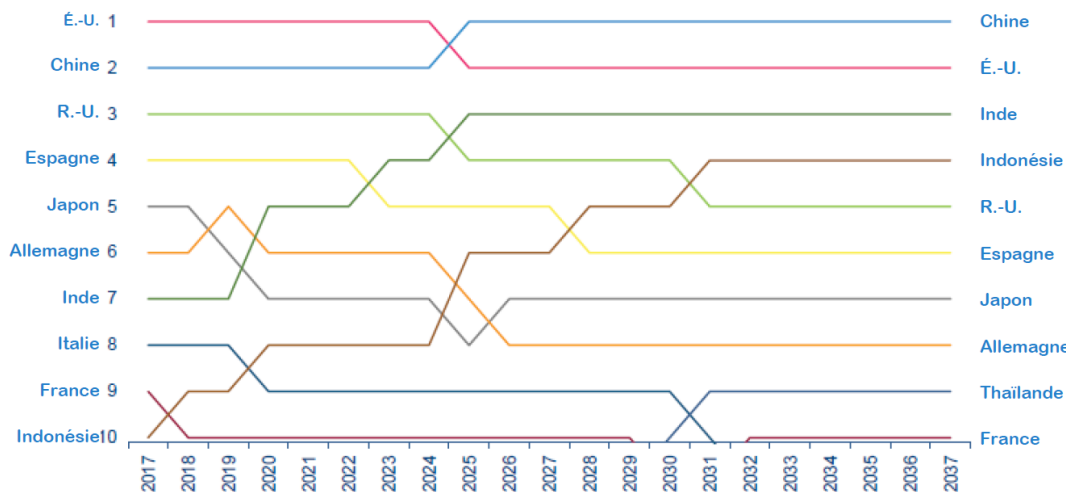


Figure 1.7 : Taux de croissance annuel du marché aérien (2017-2037) (tiré de : Airbus, 2018)

Cet essor des pays émergents devrait causer un renversement au niveau du classement aérien comme il est illustré à la figure 1.8. Les États-Unis, meneurs de nos jours, devraient être devancés par la Chine autour de 2025. L'Inde pourrait passer au 3<sup>e</sup> rang pour surpasser le Royaume-Uni et l'Indonésie devrait

faire une ascension du 10<sup>e</sup> rang au 4<sup>e</sup> rang. L'Italie serait également écartée des 10 plus gros marchés et serait remplacée par la Thaïlande. (IATA, 2018b)



**Figure 1.8 : Les 10 plus grands marchés de passagers au fil des ans** (tiré de : IATA, 2018b)

Ces prévisions feront nécessairement pression sur l'industrie. Pour faire face à cette demande grandissante, les aéroports et les compagnies aériennes devront s'adapter afin d'accroître leur capacité. Les infrastructures aéroportuaires, actuellement jugées insuffisantes pour les besoins futurs, devront être revues et repensées (IATA, 2018b). Les flottes aériennes, quant à elles, devront compter près de 48 000 avions d'ici 2038 (Chiambaretto, 2019, 8 mai) ce qui représente une augmentation d'environ 50 % par rapport à aujourd'hui. Finalement, la connectivité aérienne, cette capacité à acheminer un passager d'un point A vers un point B avec un minimum de correspondances, devra également être revue pour répondre à la future demande mondiale. (OACI, 2013a)

### 1.5.2 Gestion du progrès technologique

L'expansion du *big data* influence les industries, les gouvernements et le public. L'accès à l'information est un élément important qui touche le secteur aérien de différentes manières. Une bonne accessibilité facilite la protection et la sécurité des voyageurs et pourrait permettre de créer un monde plus connecté. De plus, les avancées en matière d'analyse de données peuvent contribuer au progrès technologique et influencer les comportements des consommateurs. En contrepartie, cette profusion de données accroît le risque de cyberterrorisme. Pour éviter certaines tensions, il sera nécessaire d'établir un équilibre entre confidentialité des données et requis de surveillance. (IATA et School of internationales futures, 2018)

L'industrie devra également s'adapter aux développements technologiques à venir. En effet, on peut s'attendre à une diversité des modèles d'aéronefs, mais aussi à une diversité des utilisations due aux opportunités commerciales et à une possible expansion des appareils pilotés à distance. (OACI, 2019e) L'espace aérien disponible, lui, demeure inchangé. L'intégration de tous ces appareils devra ainsi être prise en charge, notamment par le biais d'une bonne gestion du trafic aérien.

### **1.5.3 Incertitude liée au contexte géopolitique**

Les prévisions concernant le trafic aérien sont basées sur un contexte politique inchangé. Cependant, l'incertitude liée à certains événements ou conflits internationaux pourrait ralentir la croissance du secteur comme le Brexit ou les tensions entre les États-Unis et la Chine. Une montée du protectionnisme pourrait en effet miner la coopération internationale, mettre à risque la connectivité aérienne et ainsi influencer la mobilité mondiale. (IATA, 2018b)

### **1.5.4 Croissance durable**

D'un côté, il y a cette croissance marquée du secteur attendue dès 2037 et de l'autre, l'urgence de réduire l'empreinte carbone afin de limiter les effets sur le réchauffement climatique : comment arrimer ces deux oppositions? Comment restreindre les émissions de GES de l'aviation civile sans toutefois limiter son expansion? Une décarbonisation du transport aérien est-elle même possible dans un délai aussi court? Ce sont à ces questions que tentera de répondre cet essai. La croissance durable est un défi de taille que l'industrie aérienne aura à surmonter.

## **2. ACCORDS INTERNATIONAUX ENCADRANT L'AVIATION CIVILE EN MATIÈRE DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT**

L'aviation civile est un secteur international qui concerne de nombreux acteurs et qui comporte des répercussions d'ordres politiques. Lorsqu'il s'agit d'entreprendre des mesures pour limiter un phénomène aussi global que le réchauffement climatique, un engagement universel est nécessaire afin de parvenir à un résultat. Ce chapitre a donc pour objectif de définir sommairement le cadre réglementaire et politique entourant la gestion du transport aérien en relation avec la protection de l'environnement. Cela permettra également de saisir les rôles et responsabilités des différentes parties prenantes impliquées.

### **2.1 Synthèse des événements importants et contexte politique**

Afin de bien comprendre l'historique derrière l'aviation civile et la protection de l'environnement, il est nécessaire de revoir certains événements importants. Ceux-ci sont détaillés de manière chronologique dans les sections suivantes.

#### **2.1.1 Convention de Chicago et création de l'OACI (1944)**

La Deuxième Guerre mondiale a conduit à un grand développement du secteur aérien. Ce faisant, des défis à la fois politiques et techniques ont vu le jour créant de nouveaux besoins communs pour plusieurs pays. Les États-Unis ont ainsi invité à Chicago 55 pays afin de participer à une conférence internationale sur l'aviation civile. 54 États ont répondu à l'appel et parmi eux, 52 ont signé la Convention relative à l'aviation civile internationale, appelée de nos jours « Convention de Chicago ». Cette entente a pour objectif le développement de l'aviation civile « d'une manière sûre et ordonnée et de façon que les services aériens soient établis sur la base de l'égalité des chances et exploités d'une manière saine et économique ». Cet événement a également mené à la création de l'OACI en avril 1947 dans le but de structurer et d'organiser cette coopération mondiale nécessaire à ce nouveau réseau de transport. Quelques mois plus tard, l'organisation devenait une institution spécialisée de l'Organisation des Nations Unies (ONU) regroupant 193 États membres. (OACI, s. d.b) Au sein de l'OACI, c'est le Comité de la protection de l'Environnement en aviation (CAEP) qui est responsable, depuis 1983, d'étudier et de proposer des solutions pour minimiser les impacts environnementaux de l'industrie. (OACI, 2019d)

Dans cette perspective, il est important de mentionner la Convention de Chicago puisque certains engagements pris à ce moment ont encore des conséquences aujourd'hui. Effectivement, l'objectif initial de la convention était de favoriser le développement du secteur dans un contexte d'après-guerre et pour cette raison, l'aviation civile bénéficie ainsi d'une exonération fiscale sur le carburant. (Cohen, 2019, 13 mai) Cette exemption n'est cependant pas inconditionnelle comme il est souvent sous-entendu par les médias. En effet, tel qu'il est écrit dans la Convention de Chicago, cette exonération ne s'applique « qu'au carburant se trouvant dans un aéronef d'un État contractant à son arrivée sur le territoire d'un autre État contractant et s'y trouvant encore lors de son départ de ce territoire ». C'est seulement ce carburant qui



est exempt de frais de visite, de droits de douane ou de redevances semblables exigés par le pays. (OACI, 1944) De nos jours, toutefois, le contexte a bien changé et il est légitime de se demander si cette situation est toujours valable. Cet élément sera abordé à nouveau dans le chapitre 5 portant sur la tarification du carbone.

### **2.1.2 Protocole de Kyoto (1997)**

En 1997, le premier accord international, organisé sous la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, visant une réduction des émissions de GES est conclu. Il faut ensuite attendre huit ans avant que la condition d'entrée en vigueur (ratification de 55 pays représentant au moins 55 % des émissions de GES) ne soit remplie en février 2005. Pour la première période d'engagement, de 2008 à 2012, 37 pays industrialisés, incluant l'Union européenne (UE), se sont engagés à réduire leurs émissions de GES de 5 % par rapport à l'année de référence de 1990. Selon l'ONU, l'objectif aurait été atteint avec une réduction supérieure à 20 %. (Organisation des Nations Unies [ONU], 2017) Il faut cependant relativiser ce résultat en considérant le contexte politique et économique de cette période. À partir de 1990, le bloc de l'Est s'est effondré causant une chute des émissions de GES d'environ 40 % entre 1990 et 2012. Par ailleurs, la crise économique de 2008 a aussi provoqué un ralentissement des activités à l'échelle mondiale. Il faut également noter que les États-Unis, bien qu'ils aient signé l'entente, ne l'ont jamais ratifiée alors qu'ils représentaient le plus grand pays émetteur. Le Canada, sous le gouvernement Harper, s'est retiré du protocole à la toute fin, loin d'atteindre ses objectifs. (Leblanc, 2015, 15 février) Il est donc possible de croire que les résultats publiés par l'ONU ne sont peut-être pas attribuables en totalité à une véritable diminution des émissions de GES, mais plutôt à des circonstances économiques et politiques particulières.

Dans le même ordre d'idées, il est pertinent de mentionner que les émissions du secteur maritime et aérien à l'international ne sont pas couvertes par le protocole de Kyoto. En effet, les organismes respectifs des Nations unies, l'OACI et l'Organisation maritime internationale (OMI), ont hérité de la responsabilité de réduire les émissions de GES de leur secteur. Autrement dit, les engagements de réduction d'émissions de GES des pays signataires du protocole de Kyoto n'incluaient pas le transport aérien et maritime international. (Transport & Environment, 2009) Les émissions de GES provenant des vols internationaux étant relâchées à l'extérieur des limites juridiques, il devenait difficile de départager la responsabilité de ces émissions entre les États. C'est ce qui explique, en partie, pourquoi elles ont été écartées du Protocole de Kyoto. (Chalifour et Besco, 2018)

### **2.1.3 Adoption du programme d'action sur l'aviation internationale et les changements climatiques (2009)**

En 2008, l'OACI a créé le groupe sur le changement climatique international de l'aviation responsable d'élaborer un programme d'action pour contrer les changements climatiques. En octobre de l'année

suivante, lors de la Réunion de haut niveau sur l'aviation internationale et les changements climatiques, ce programme a été adopté. Celui-ci suggère la mise en place d'un mécanisme basé sur un marché (MBM) mondial notamment le commerce d'émissions (ETS : *Emission trading scheme*), la compensation et la taxe carbone. Les divers représentants de l'industrie, dont l'IATA, la *Civil Air Navigation Services Organisation*, le Conseil international des aéroports et l'ATAG, ont également participé à la réalisation de ce programme d'action qui énonce d'ailleurs les cibles environnementales du secteur (Korber Gonçalves, 2017; OACI, 2009):

- Améliorer le rendement du carburant de 2 % annuellement d'ici 2020
- Stabiliser les émissions de CO<sub>2</sub> grâce à une croissance neutre à partir de 2020
- Atteindre d'ici 2050 une réduction absolue de 50 % de ses émissions de CO<sub>2</sub> par rapport au niveau de 2005

#### **2.1.4 Décision de l'OACI d'adopter un mécanisme basé sur le marché (2013)**

À la 38<sup>e</sup> Assemblée de l'OACI, en 2013, les États membres ont appuyé la planification stratégique du secteur en acceptant d'élaborer un mécanisme basé sur un marché mondial pour contrer les changements climatiques. Les États ont convenu également de soumettre pour la prochaine assemblée, en 2016, un plan concernant la faisabilité et la mise en pratique de cette mesure dans la perspective d'un déploiement en 2020. (OACI, 2013c) Il a cependant fallu beaucoup d'efforts pour en arriver à une telle décision. D'abord, les pays en voie de développement comme la Chine, le Brésil et l'Inde, ont signifié leur objection en refusant des cibles de réduction et les États-Unis ont adopté une position incertaine dans les négociations. Ensuite, les lignes directrices de l'OACI, basées sur la préservation du secteur et sur son expansion, qui allaient, en quelque sorte, à l'encontre de la lutte contre les changements climatiques n'ont pas aidé à la situation. Finalement, différentes visions, opposant mesures unilatérales et mesures multilatérales, étaient partagées entre les acteurs. À titre d'exemple, face au manque de consensus, l'Union européenne a souhaité mettre en place son propre système d'échange de droits d'émissions, désormais connu sous le nom de EU ETS (*European Union Emission Trade System*), en exigeant que tout aéronef atterrissant ou décollant de l'UE doive y participer. Le système se voulait donc inclusif à l'aviation intra-européenne, mais aussi à l'aviation internationale. Cette initiative a provoqué de fortes oppositions de la part des États non européens qui se sont défendus en affirmant que les décisions devraient être prises de manière commune et non unilatéralement. C'est pourquoi le système EU ETS que l'on connaît de nos jours ne couvre que les vols intra-européens. (Korber Gonçalves, 2017)

#### **2.1.5 Accord de Paris (2015)**

En décembre 2015, l'Accord de Paris qui vise à limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C, voire 2 °C d'ici 2100, a été conclu. Il a également pour objectif d'augmenter la capacité d'adaptation des pays à faire face aux changements climatiques tout en rendant le développement économique compatible avec de faibles émissions de GES. Aujourd'hui, le nombre de pays ayant ratifié l'Accord s'élève à 186 sur 195

(ONU, 2019a). Dans l'atteinte de ses objectifs, l'entente exige que les États mettent en place des contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN) en plus de rendre compte régulièrement de leurs émissions de GES. Or, les émissions relatives aux transports aérien et maritime internationaux sont toujours écartées de l'Accord de Paris de la même façon qu'elles l'ont été du Protocole de Kyoto. (OACI, s. d.b) En 2018, la proportion du trafic aérien associée aux vols internationaux représentait 64 % du marché. (IATA, 2019) C'est donc dire que les accords visant à limiter le réchauffement climatique excluaient 64 % des émissions de GES du secteur aérien.

## 2.2 Stratégie de réduction de CO<sub>2</sub> de l'OACI

À la 39<sup>e</sup> Assemblée de l'OACI, en 2016, tel que prévu, les États membres de l'OACI ont adopté le texte final d'une résolution basée sur un régime de MBM : le Programme de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA). Ce programme complète, jusqu'à maintenant, la stratégie établie par l'OACI et la communauté aéronautique afin de réduire les émissions du secteur. (OACI, 2016b) Cette stratégie, sous forme de « panier de mesures », est présentée plus en profondeur dans les sections suivantes.

### 2.2.1 Nouvelles technologies liées à la performance des avions

L'industrie aérienne compte toujours sur les progrès technologiques en matière de performance pour minimiser la consommation de carburant et ainsi réduire les impacts environnementaux. À titre d'exemple, la première norme mondiale régulant les émissions de CO<sub>2</sub> a été adoptée par l'OACI en 2017. Elle concerne la certification des nouvelles conceptions d'avion à partir de 2020 (NP) et s'appliquera à toute conception déjà en production à partir de 2023 (inP) comme il est possible de le constater à la figure 2.1. La norme s'appliquera à tous les avions subsoniques de 5700 kilogrammes (kg) et plus et aux avions à hélices dont le poids dépasse 8618 kg. Le développement de la norme a été effectué en considérant tous les types de progrès technologiques possibles concernant le design d'un avion : le système de propulsion, l'aérodynamique et la fabrication de la structure. La performance, en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>, est basée sur la consommation de carburant. (OACI, 2016b)

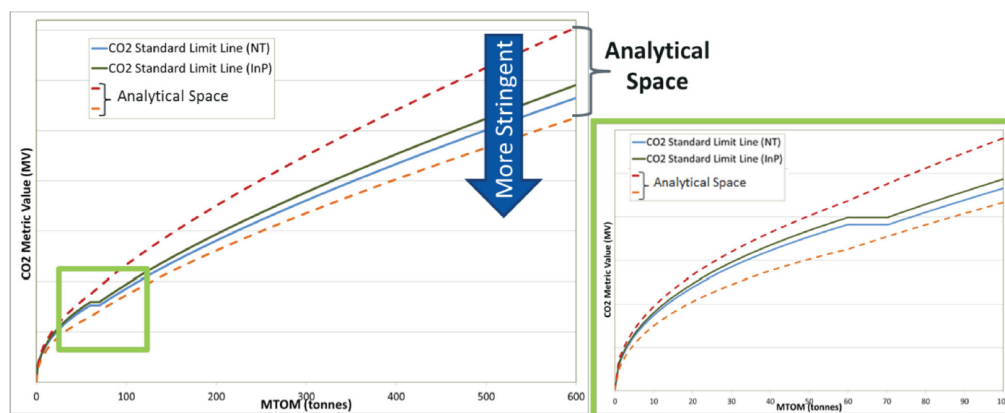


Figure 2.1 : Limites imposées par la norme sur le carbone (tiré de : OACI, 2016b)

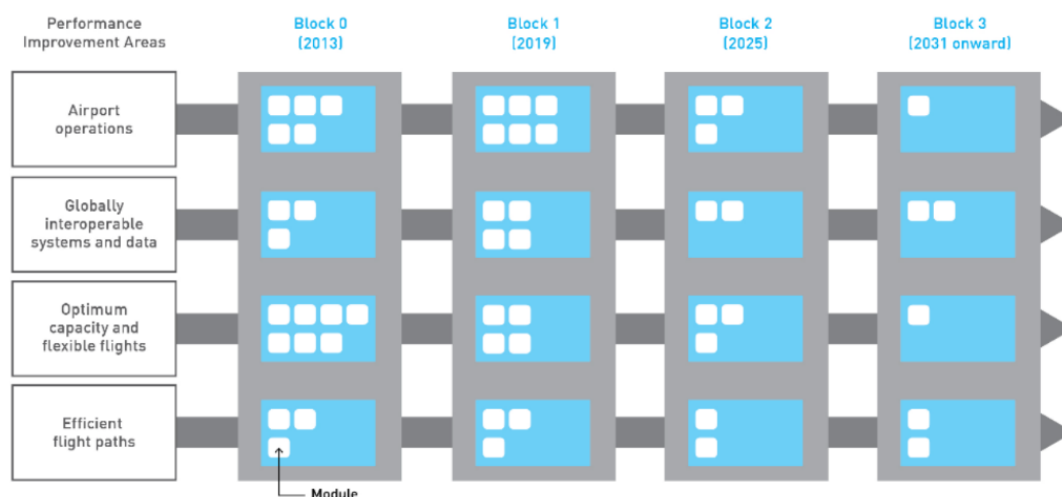
Afin d'établir les limites de la norme et de pouvoir comparer les aéronefs entre eux, des critères ont été établis dont la masse maximale au décollage. La norme est d'ailleurs particulièrement contraignante pour les avions dont cette celle-ci est supérieure à 6000 kg, ce qui représente plus de 90 % des émissions liées à l'aviation internationale (figure 2.1). La valeur métrique de CO<sub>2</sub> utilisée pour la nouvelle norme dépend de la consommation de carburant et d'un facteur de référence géométrique afin d'intégrer les différentes conceptions d'aéronefs. (OACI, 2016b)

Le Comité de la protection de l'Environnement en aviation (CAEP) a également conduit une analyse afin d'obtenir une estimation des bénéfices économiques et environnementaux de l'application de la norme en comparaison avec un scénario de base *business as usual*. Cette analyse porte à croire que l'application de la norme devrait contribuer à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. (OACI, 2016b) Cependant, il est pertinent de se demander à quel moment ces réductions seront véritablement réalisées. Effectivement, avant qu'un nombre assez important d'aéronefs conformes à cette nouvelle norme ne soient en service à l'échelle planétaire, il devrait s'écouler quelques années encore...

D'autres recherches sont attendues afin d'exploiter de nouveaux procédés de fabrication dont les technologies de fabrication additive et l'imprimante 3D. Ces méthodes permettent de produire des pièces par ajout de matière au lieu d'en retirer à partir d'un bloc de métal, ce qui mène à des pièces plus légères et géométriquement plus efficaces. L'autorisation d'utiliser les technologies sans-fils à bord, accordée en 2015 par l'Union internationale des télécommunications, pourrait permettre aussi de réduire le poids des avions en remplaçant près de 30 % des harnais électriques par des systèmes sans-fils. (OACI, 2016b)

### **2.2.2 Nouvelles technologies liées aux procédures opérationnelles**

L'amélioration et l'optimisation de la gestion du trafic aérien font également partie du panier de mesures de l'OACI. En 2012, lors de la 12<sup>e</sup> conférence sur la navigation aérienne, la stratégie sur l'*Aviation system block upgrade* (ASBU) a été adoptée. Elle fait d'ailleurs partie du Plan mondial de navigation aérienne de l'OACI qui expose les principes clés de l'aviation civile encadrant la planification de la navigation aérienne régionale et globale (OACI, 2016c). Élaborée de concert avec l'industrie aérienne, les organisations internationales et les pays, la stratégie ASBU établit une feuille de route pour l'implantation d'une série de concepts relatifs à la gestion du trafic aérien dans l'objectif de maintenir la sûreté et l'efficacité du secteur face à l'augmentation du trafic aérien tout en maximisant les bénéfices environnementaux. La figure 2.2 schématise l'approche ASBU ainsi que les secteurs d'amélioration ciblés. (Brain, 2019) Les différents modules correspondent à des améliorations opérationnelles dont certaines peuvent fournir des bénéfices en matière d'environnement. Par exemple, pour le bloc 0, le CAEP avait identifié que 15 des 18 modules pourraient potentiellement réduire l'impact environnemental. (OACI, 2016b)



**Figure 2.2 : L'approche ASBU** (tiré de : Brain, 2019)

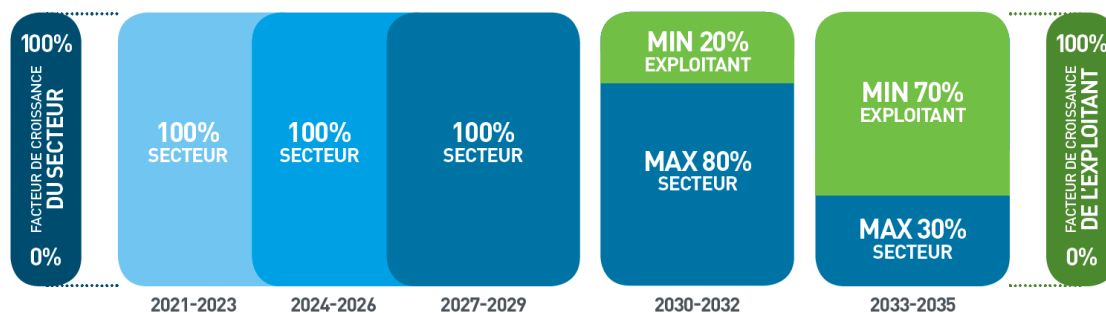
Initié en 2013, le déploiement des blocs ASBU devrait s'étendre jusqu'en 2031. En 2018, une réduction de 2,5 Mt à 4,9 Mt de carburant a pu être attribuée à l'implantation du bloc 0 depuis 2013 ce qui équivaut à 7,8 Mt et 15,4 Mt de CO<sub>2</sub>. (OACI, 2016b) Ces chiffres peuvent sembler impressionnants, mais lorsqu'ils sont ramenés en valeurs relatives, celles-ci ne s'élèvent pas même à 2 % des émissions de GES du secteur par rapport à 2018.

De façon similaire au bloc 0, les bénéfices environnementaux liés à l'implantation du bloc 1, qui doit s'étirer jusqu'en 2025, ont été estimés par le CAEP. Toutefois, celui-ci a conclu que les améliorations ne peuvent être dissociées du bloc 0 et doivent donc être évaluées de manière cumulative. Les réductions associées au bloc 0/1 ont ainsi été estimées entre 5,4 Mt et 10,7 Mt en termes de quantité de carburant et entre 17,2 Mt et 33,7 Mt en termes de CO<sub>2</sub>. (OACI, 2019d) Les blocs 2 et 3 comportent moins de modules que leurs précédents comme on peut le constater à la figure 2.2. Il est ainsi possible de croire que les gains environnementaux seront moins importants.

### 2.2.3 Programme de compensation et de réduction de crédits de carbone CORSIA

Afin de stabiliser les émissions de GES du secteur au niveau de référence 2020, l'industrie aérienne a décidé d'adopter le programme CORSIA, un mécanisme basé sur un marché mondial, pour permettre une compensation des émissions de CO<sub>2</sub> des compagnies aériennes par l'achat d'unités d'émissions du marché du carbone. Autrement dit, pour chaque tonne de CO<sub>2</sub> émise au-delà du seuil de référence, une compagnie aérienne devra acheter un crédit de compensation afin de « l'annuler ». Ce seuil représente la moyenne des émissions totales de CO<sub>2</sub> des années 2019 et 2020 associées aux routes couvertes par CORSIA seulement (OACI, 2019a). Il est entendu que celles-ci peuvent varier au fil du temps. L'OACI en est consciente, c'est pourquoi le seuil de référence devra être recalculé chaque année afin d'intégrer les changements, s'il y a lieu.

Dans les premières années de CORSIA, la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> à compenser variera selon la croissance des émissions de GES du secteur aérien depuis 2020 plutôt que selon celle de l'exploitant. Le requis de compensation total sera ensuite divisé entre les compagnies aériennes au prorata. C'est ce qu'on appelle l'approche sectorielle. Cette approche implique que les plus gros exploitants auront possiblement une plus grande quantité de CO<sub>2</sub> à compenser que ce dont ils sont réellement responsables. Cette méthode a pour objectif de laisser le temps aux plus jeunes compagnies de rattraper les marchés plus matures. (Timperley, 2019, 4 février; OACI, s. d.a) À partir de 2030, l'approche sectorielle sera graduellement délaissée au profit de l'approche individuelle selon laquelle les requis de compensation pour une compagnie aérienne sont calculés en fonction de sa propre croissance (figure 2.3). Pour 2033 à 2035, les requis de compensation seront calculés à 70 % basé sur l'approche individuelle et à 30 % sur l'approche sectorielle. (OACI, s. d.a)

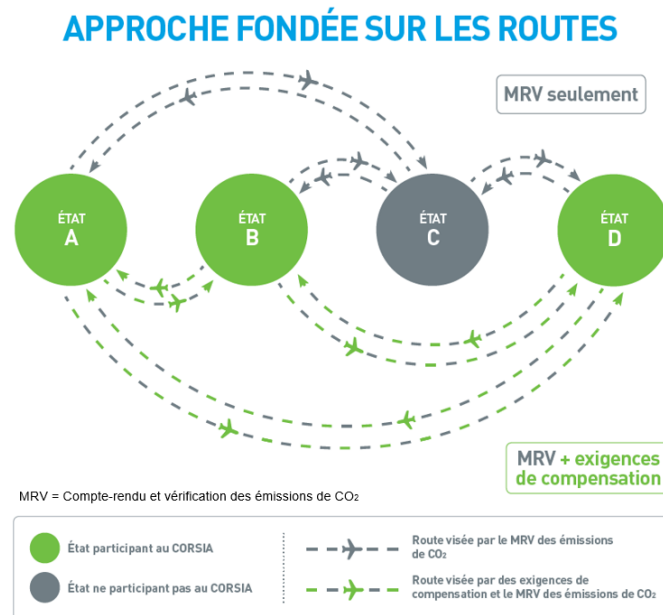


**Figure 2.3 : Évolution des requis de compensation** (tiré de : OACI, s. d.a)

CORSIA est actuellement prévu pour la période allant de 2021 à 2035 seulement. Des évaluations sont prévues tous les trois ans, mais en 2032, une revue particulière sera réalisée par l'OACI afin de déterminer si une extension du programme est nécessaire (OACI, 2019a). Le déploiement de CORSIA sera réalisé en deux phases en plus d'une phase pilote. Celle-ci (2021-2023) ainsi que la première phase (2024-2026), ne s'appliqueront qu'aux États membres ayant accepté volontairement de participer au programme. La seconde phase (2027-2035) deviendra obligatoire pour tout État membre « dont la part individuelle des activités de l'aviation internationale pour 2018 est supérieure à 0,5 % du total mondial » ou s'il fait partie des pays qui détiennent 90 % des activités mondiales. Seuls sont épargnés les pays les moins développés, les petits états insulaires en développement ainsi que les états en développement sans littoral, à moins qu'ils n'adhèrent volontairement au programme. (OACI, s. d.a) Certaines exemptions sont également prévues, afin d'éviter un fardeau administratif, pour des activités aériennes internationales à faible niveau. Par conséquent, les opérateurs d'aéronefs émettant moins de 10 000 tonnes de CO<sub>2</sub> ainsi que les avions de moins de 5700 kg seront exclus du programme CORSIA. À noter que les opérations humanitaires, médicales et de lutte contre les incendies sont aussi exemptées. (OACI, 2019a)

Quoi qu'il en soit, tous les pays membres de l'OACI, même s'ils ne participent pas au programme CORSIA, devront assurer le suivi et fournir un compte-rendu ainsi qu'une vérification des émissions de GES de leurs vols internationaux, et ce à partir de 2019. Afin de déterminer l'applicabilité du programme,

une approche basée sur les routes est utilisée (figure 2.4). Ainsi, une route effectuée entre deux états participants devra être comptabilisée. Inversement, un vol ne sera pas couvert par CORSIA dès qu'un état inclus sur la route n'est pas participant même s'il ne sert que d'escale. (OACI, s. d.a) Cette façon de faire pourrait potentiellement inciter les compagnies aériennes à transiter dans des pays non participants afin de diminuer leurs obligations de compensation.



**Figure 2.4 : Approche CORSIA basée sur les routes** (tiré de : OACI, s. d.a)

En date du 16 juillet 2019, 81 états participeront à la phase pilote de CORSIA. La liste de ces pays est disponible à l'Annexe 1. Ceux-ci représentent 77 % de l'activité aérienne internationale selon l'OACI (2019). Cependant, la Chine et l'Inde, où la croissance du trafic aérien devrait être significative tel que vu à la section 1.5.1, n'ont pas démontré leur intérêt à participer à la phase pilote.

## 2.2.4 Développement de carburants alternatifs durables

La dernière mesure de la stratégie de l'OACI consiste à effectuer une transition vers des carburants alternatifs dits « plus verts ». L'emploi du terme « carburant alternatif durable (SAF) » est préféré par l'industrie aérienne puisqu'il est plus global que « biocarburant ». En effet, les biocarburants réfèrent habituellement à un carburant fabriqué à partir de ressources biologiques comme le maïs, la canne à sucre, l'huile de palme ou le soya. De nos jours, toutefois, de nouvelles technologies permettent la production de carburant à partir de ressources alternatives, autres que biologiques, et ce sont elles que le secteur désire surtout exploiter afin d'éviter les conflits éthiques liés aux ressources biologiques. (ATAG, 2017) Ces derniers seront abordés de manière plus approfondie au chapitre 6.

La composition chimique des SAF étant similaire à celle des carburants conventionnels, il est possible de les mélanger en utilisant les mêmes infrastructures. Il n'est donc pas nécessaire d'adapter les installations

existantes des aéroports. C'est pourquoi ils sont appelés *drop in fuels*. L'industrie suggère qu'il serait plus facile d'implanter les SAF pour le secteur aérien que pour d'autres secteurs, comme le transport routier, puisque son réseau de distribution est de plus petite envergure. Il existe en effet un nombre très élevé de stations à essence comparativement au nombre d'aéroports et le nombre de véhicules en circulation est aussi considérablement réduit pour le secteur aérien. La centralisation du réseau de ravitaillement aérien pourrait ainsi faciliter la mise en service des SAF selon l'ATAG (2017).

Le déploiement des SAF est considéré comme un élément majeur dans l'atteinte d'une croissance neutre du secteur. En effet, leur utilisation pourrait permettre de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> sur l'entièreté du cycle de vie du carburant, et ce jusqu'à 80 %, dans certains cas. Les SAF contiendraient aussi moins d'impuretés comme les sulfures, ce qui permettrait une amélioration de la qualité de l'air. Selon les prévisions de l'OACI, une substitution totale des carburants conventionnels par les SAF pourrait réduire les émissions de CO<sub>2</sub> jusqu'à 63 % d'ici 2050. Cela représenterait l'élément le plus significatif pour l'aviation internationale dans sa volonté de réduire son empreinte carbone. (OACI, 2017; ATAG, 2017) Cependant, les probabilités qu'une telle situation se produise sont néanmoins faibles considérant le niveau actuel de production.

Bien que la faisabilité technique des carburants alternatifs ait été démontrée, plusieurs défis se dressent devant sa commercialisation dont les coûts de production élevés qui ont des répercussions sur la différence de prix entre les SAF et les carburants conventionnels, ce qui limite actuellement leur expansion. (ATAG, 2017) Certains questionnements s'orientent vers la disponibilité des ressources premières. Sont-elles présentes en quantités suffisantes? Sauront-elles répondre à la demande? Quelles voies technologiques devraient être privilégiées afin de fabriquer des carburants alternatifs durables? Ces questions seront discutées plus en profondeur dans le chapitre 6 qui porte sur le sujet.

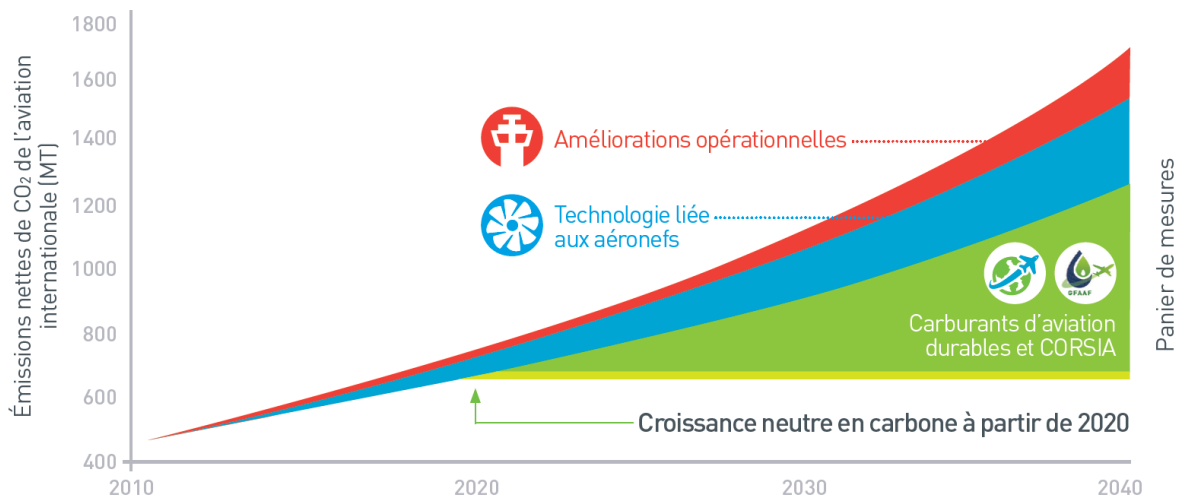
### **2.2.5 Effet cumulatif du panier de mesures en matière de réduction de CO<sub>2</sub>**

Le panier de mesures énoncé par l'OACI laisse entrevoir des réductions importantes de CO<sub>2</sub> dans les années à venir. Or, ces réductions peuvent-elles contrer l'expansion attendue du secteur et assurer une croissance neutre à partir de 2020? L'OACI s'est déjà attardée sur la question et avec des réductions annuelles de carburant allant de 1 % à 2 %, liées aux améliorations technologiques et opérationnelles, il ne serait pas possible d'atteindre cette croissance neutre tel que démontré à la figure 2.5. (Timperley, 2019, 4 février; OACI, 2016b).

Le panier de mesures comprend toutefois deux autres avenues pour atteindre ces objectifs : le programme de compensation CORSIA et le développement de carburants alternatifs durables. Il a été estimé que CORSIA pourrait permettre une réduction d'environ 3 Gt de CO<sub>2</sub> entre 2021 et 2035, via la compensation, ce qui représenterait une économie annuelle de 164 Mt. (IATA, s. d.a) Cela peut sembler



beaucoup, mais en regardant la figure 2.5, on constate que les émissions de CO<sub>2</sub> augmenteront d'environ 1000 Mt entre 2020 et 2040.



**Figure 2.5 : Contributions des mesures visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation civile internationale** (tiré de : OACI, 2016b)

Du côté des carburants alternatifs, en 2050, selon les prévisions, on pourrait assister à un écart de 1039 Mt de CO<sub>2</sub> avec le seuil de référence de 2020 une fois les avancées technologiques et opérationnelles prises en compte. Afin d'être en mesure d'atteindre cette réduction importante de 1039 Mt, il faudrait que la quasi-totalité des combustibles fossiles soit remplacée par des carburants alternatifs. (OACI, 2016b) Cette situation semble à premier abord impossible compte tenu du fait qu'à ce jour, les SAF représentent moins de 1 % de la demande en carburant et qu'on estime que cette proportion ne devrait que doubler d'ici 2025. (OACI, 2019d)

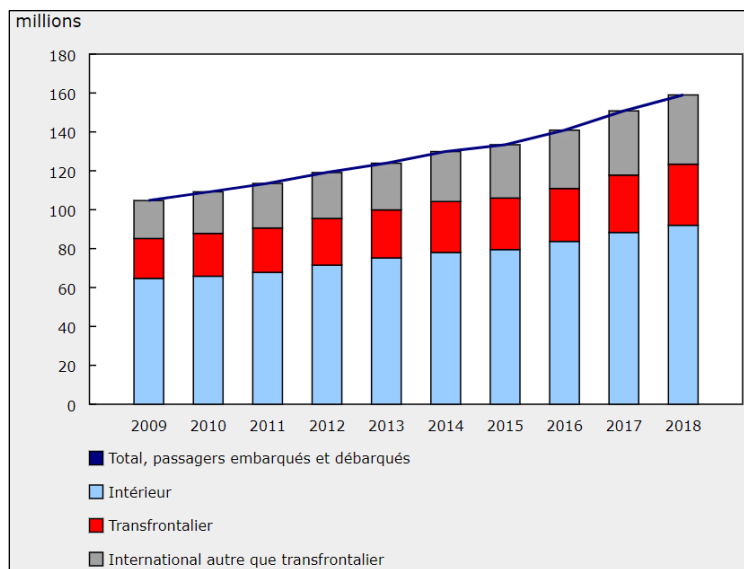
Tel qu'on peut le constater, le programme CORSIA ainsi que le développement des SAF sont des éléments cruciaux de la stratégie de réduction d'émissions de GES de l'industrie aérienne dans l'atteinte de ses objectifs. Or, il semble que celle-ci porte de grands espoirs en ces mesures, c'est pourquoi elles ont été choisies pour être davantage explorées dans le présent essai. Cela sera réalisé principalement à travers les chapitres 5 et 6 qui portent respectivement sur la tarification du carbone et le développement des carburants alternatifs durables.

### 3. L'AVIATION CIVILE AU CANADA

Le Canada possède des particularités géographiques et démographiques qui justifient l'importance du secteur aérien pour le pays. C'est en effet le 2<sup>e</sup> pays le plus vaste au monde bien qu'il soit le moins peuplé du G7 avec près de 37 millions d'habitants, ce qui correspond à une densité démographique de 3,9 personnes par kilomètre carré. Également, plus de la moitié de la population se trouve près de la frontière canado-américaine, mais il existe toutefois des régions éloignées, faiblement peuplées, qui ne peuvent être approvisionnées autrement que par voie aérienne. Le secteur aérien joue ainsi un rôle important dans la vie des Canadiens puisqu'il contribue au commerce national et international en plus de connecter les gens à travers le pays. Il en résulte donc une forte demande liée au transport de personnes et de marchandises. (Transport Canada, 2012; ECCC, 2017a) Dans le but de mieux comprendre le contexte national entourant l'aviation canadienne, ce chapitre présentera l'évolution du secteur ainsi qu'un portrait des émissions de GES. Par la suite, il sera question du plan d'action du Canada et de ses politiques nationales concernant la réduction des émissions de GES.

#### 3.1 Évolution de l'aviation civile à l'échelle nationale

C'est en 1920 qu'a eu lieu, au Canada, le premier vol commercial avec passagers. (Adamski et Fisher, 2015) Depuis, tel que pour le reste du monde, le trafic aérien a fait un bond phénoménal. De seulement 2009 à 2018, le nombre de passagers transitant au pays a augmenté de plus de 50 % comme il est possible de constater à la figure 3.1 (Statistique Canada, 2019). Les trois aéroports les plus achalandés au Canada sont Toronto, Vancouver et Montréal. (Transport Canada, 2018a)



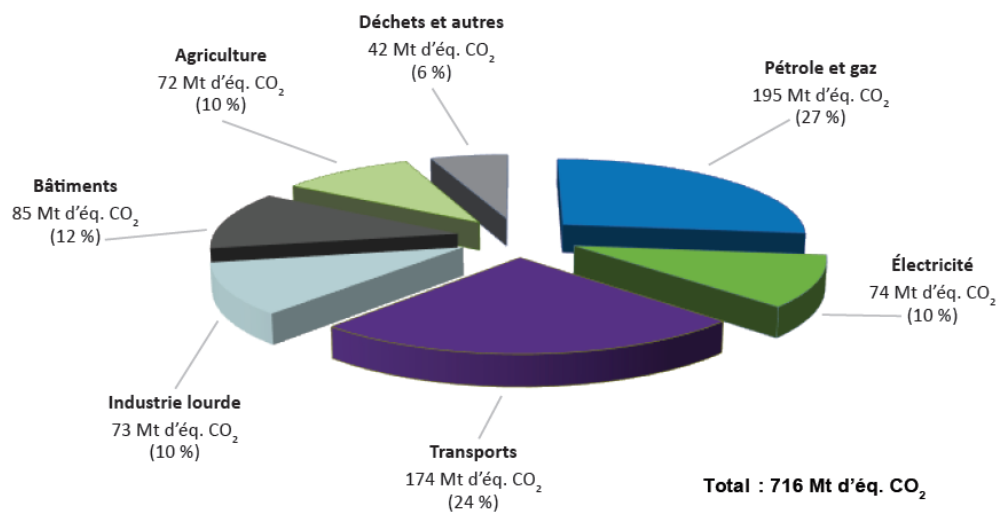
**Figure 3.1 : Trafic aérien passager au Canada** (tiré de : Statistique Canada, 2019)

L'industrie aérienne joue également un rôle clé dans l'économie canadienne. Effectivement, le pays, considéré comme leader mondial dans le domaine, se classe au 1<sup>er</sup> rang pour la fabrication de simulateurs de vols, au 2<sup>e</sup> rang pour la production d'avions d'affaires et au 3<sup>e</sup> rang pour la production

d'avions civils. Il est, à ce jour, le seul pays à se retrouver dans les cinq premiers rangs pour toutes les catégories. Avec près de 700 compagnies œuvrant dans le domaine, l'industrie a généré 27 milliards de revenus en 2016. (Invest in Canada, 2018; Charest, 2019) Le Canada est ainsi très impliqué dans cette industrie et devrait être concerné par les efforts de réduction d'émissions de GES du secteur puisqu'il en sera nécessairement touché.

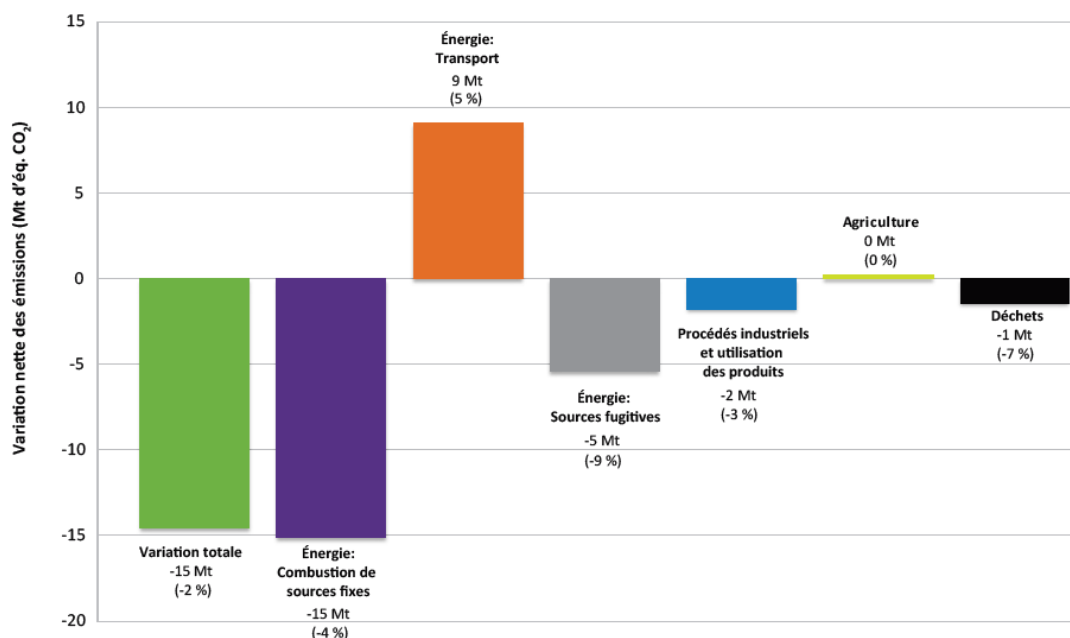
### 3.2 Portrait des émissions de GES du secteur

En 2017, les émissions de GES du Canada s'élevaient à 716 Mt d'éq. CO<sub>2</sub>. Depuis 2016, elles ont cependant augmenté de 8 Mt en raison du secteur du pétrole. Le secteur des transports, quant à lui, occupe le 2<sup>e</sup> rang au pays avec 24 % des émissions (figure 3.2). (ECCC, 2019b)



**Figure 3.2 : Répartition des émissions de GES par secteur** (tiré de : ECCC, 2019b)

La figure 3.3 illustre les variations des émissions de GES par secteur de 2005 à 2017. Globalement, celles-ci ont diminué de 2 % ce qui équivaut à 15 Mt. Il est possible de constater que seul le secteur des transports a connu une variation positive, contrebalançant ainsi partiellement le recul des autres secteurs. Cette augmentation est surtout liée au transport routier qui est d'ailleurs responsable de 72 % des émissions du secteur à lui seul. Depuis 2005, le nombre de véhicules s'est accru de 37 %, et ce particulièrement dans la catégorie des camions (légers et lourds) provoquant ainsi une hausse des émissions de GES du secteur. Le transport aérien intérieur, quant à lui, a connu une légère diminution de ses émissions passant de 7,6 à 7,1 Mt d'éq. CO<sub>2</sub>. (ECCC, 2019b)



**Figure 3.3 : Variation des émissions de GES par secteur (2005-2017)** (tiré de : ECCC, 2019b)

Il faut toutefois noter que dans l'inventaire canadien, seuls les vols domestiques sont comptabilisés et que ceux-ci représentent environ le tiers des émissions totales liées au transport aérien canadien. Les deux tiers des émissions sont ainsi générés par l'aviation canadienne internationale. Lorsqu'on regarde les données incluant les vols nationaux et internationaux, les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> sont passées respectivement de 12,6 Mt à 21 Mt de 2005 à 2017. (Transport Canada, 2018b) Tout porte donc à croire, que la croissance provient surtout des vols internationaux puisque les émissions liées aux vols domestiques sont restées stables depuis 2005.

Cette hypothèse semble être valable, car dans le futur, Transport Canada estime que le trafic aérien intérieur augmentera annuellement de 2,8 % jusqu'en 2020 (Transport Canada, 2012) alors que le trafic international devrait augmenter de 4,4 % (Transport Canada, 2017). On prévoit ainsi que les émissions de GES liées à l'aviation augmenteront en dépit des gains en réduction de consommation de carburant puisque ceux-ci seront contrebalancés par la croissance du trafic aérien. (Chalifour et Besco, 2018)

### 3.3 Plan d'action du Canada pour réduire les émissions de GES provenant de l'aviation

Après avoir annoncé ses objectifs en matière de réduction de CO<sub>2</sub> en 2009, l'OACI a encouragé ses États membres à élaborer un plan d'action précisant quelles mesures seraient utilisées pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur de l'aviation. C'est ainsi qu'en 2012, le gouvernement canadien et l'industrie aérienne canadienne ont adopté le Plan d'action du Canada pour réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'aviation. Dans le but d'arrimer son objectif avec l'international, le plan d'action vise une amélioration moyenne annuelle d'au moins 2 % du rendement de carburant jusqu'en 2020, en comparaison avec l'année de référence 2005. Pour atteindre cet objectif, trois mesures

principales ont été identifiées : un renouvellement et une modernisation de la flotte d'avions, des opérations aériennes plus efficaces et une amélioration dans la gestion du trafic aérien. D'autres mesures complémentaires ont également été choisies. Elles regroupent la recherche et le développement sur l'impact environnemental de l'aviation, les carburants alternatifs, les activités au sol et les infrastructures des aéroports, les mesures réglementaires et la coordination internationale. (Transport Canada, 2012)

### **3.3.1 État actuel du plan d'action**

Depuis l'adoption du plan d'action en 2012, six rapports annuels ont été publiés. Le dernier, paru en 2018, résume les résultats et l'état d'avancement des diverses mesures. L'objectif principal repose sur le rendement de carburant qui est mesuré en litres par tonne-kilomètre payante (TKP). Cette dernière correspond au nombre de tonnes transportées multipliées par la distance parcourue. De façon globale, le rendement de carburant s'est amélioré depuis 2005. Celui-ci s'élevait à 40,43 L/100 TKP alors qu'en 2017, il s'élevait à 33,31 L/100 TKP, ce qui correspond à une amélioration cumulative de 17,6 %. (Transport Canada, 2018b)

De manière plus détaillée, le plan d'action regroupe un total de 16 actions dont l'une d'entre elles est complétée. Il s'agit de la publication de la norme régulant les émissions de CO<sub>2</sub>. Celle-ci a en effet été adoptée par le conseil de l'OACI en 2017 tel que mentionné à la section 2.2.1. (Transport Canada, 2018b) Bien que l'entrée en vigueur de cette norme affecte le pays, il est étonnant de constater que cette action soit présente dans le plan d'action du Canada puisqu'elle relève davantage de la juridiction internationale que nationale. Par ailleurs, le plan d'action ne comporte aucun échéancier précis, ni cibles ou objectifs ce qui en rend le suivi difficile. Effectivement, selon le rapport de 2017, toutes les actions sont en cours, mais il est impossible d'en conclure si l'industrie est en retard ou non sur son plan. La manière dont les résultats sont présentés laisse supposer que tout est sur la bonne voie alors qu'il n'est pas possible d'en faire la démonstration. Il est d'autant plus pertinent de rappeler qu'il s'agit d'un plan d'action volontaire. Par conséquent, il ne contient aucune obligation juridique (Transport Canada, 2012).

### **3.4 Politiques nationales visant à réduire les émissions de GES**

Au Canada, selon le partage des compétences, l'aviation relève de la juridiction fédérale. Contrairement aux autres types de transport, les vols intraprovinciaux sont également soumis à la législation fédérale par le biais de Transport Canada. (Gouvernement du Québec, 2002) Certaines réglementations provinciales peuvent néanmoins s'appliquer, notamment concernant les taxes sur le carburant. L'aviation civile est réglementée par la *Loi sur l'aéronautique* et plus particulièrement par le *Règlement de l'aviation canadien*. Toutefois, on n'y retrouve aucune mention des émissions de GES. (Chalifour et Besco, 2018) Le CO<sub>2</sub> n'est pas une émission régulée dans le secteur aérien au Canada, mais il le devient indirectement puisque le pays doit se conformer aux requis de l'OACI qui, à cet effet, a récemment adopté la nouvelle norme relative au CO<sub>2</sub>. C'est surtout grâce au Cadre pancanadien sur la croissance propre et les

changements climatiques (CPC) et à la norme sur les combustibles propres (NCP) que le Canada mise pour réduire ses émissions des GES.

### **3.4.1 Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques**

En décembre 2016, le CPC a été adopté par le premier ministre canadien ainsi que par ses homologues provinciaux. Il se décline selon quatre piliers : la tarification de la pollution, des mesures complémentaires pour réduire les émissions du secteur économique, l'adaptation et la résilience aux changements climatiques et l'innovation des technologies propres et la création d'emplois. Arrimé aux objectifs de l'Accord de Paris, il vise une réduction des émissions de 30 % d'ici 2030 par rapport au niveau de 2005. (ECCC, 2018a) L'élément central représente la tarification progressive des émissions de GES selon le principe du pollueur-payeur. Le Canada propose un modèle pancanadien, communément appelé le « standard fédéral », de sorte que la tarification du carbone soit appliquée partout à travers le pays. Cette approche se veut flexible et c'est pourquoi le gouvernement accepte que les provinces développent leur propre système de tarification de la pollution. En l'occurrence, s'il n'existe aucun système de tarification dans une province, alors le « standard fédéral » devra s'appliquer. Ce sera d'ailleurs le cas pour l'Ontario, le Manitoba, la Saskatchewan, le Nouveau-Brunswick et l'Alberta. (ECCC, 2018a; Forrest, 2019, 30 juillet)

Plusieurs secteurs sont couverts par le CPC. D'une part, les secteurs de l'habitation et des transports. À titre d'exemples, on y mentionne les efforts afin de produire de l'électricité à partir de sources non émettrices, la modernisation des bâtiments afin d'améliorer l'efficacité énergétique, l'adoption de nouvelles normes pour les véhicules utilitaires légers, des investissements dans les transports en commun et les bornes de recharge pour véhicules électriques. D'autre part, les secteurs de l'industrie, l'exploitation forestière, l'agriculture et des déchets sont également discutés dans le CPC. Le transport aérien, inclus dans le secteur des transports, est évoqué quelques fois. On y mentionne brièvement le Plan d'action du Canada en matière de réduction de GES dans le domaine de l'aviation, la conformité du pays au programme CORSIA et la recherche et le développement de carburants alternatifs, mais est-ce suffisant? Le secteur de l'aviation devrait-il occuper une plus grande place dans le CPC?

### **3.4.2 Norme sur les combustibles propres**

Annoncée en 2016, la NCP s'insère dans le CPC de façon complémentaire à la tarification de la pollution pour réduire les émissions de GES. Elle vise à promouvoir l'utilisation de combustibles à faible teneur en carbone et les sources d'énergie alternatives telles que l'électricité, l'hydrogène ou le gaz naturel renouvelable. Celle-ci s'appliquera aux carburants solides, liquides et gazeux. La norme est adoptée dans l'objectif global de diminuer les émissions de 30 Mt d'ici 2030, en ligne avec les cibles de l'Accord de Paris. Le règlement est attendu pour 2020 et son entrée en vigueur prévue pour 2022. (ECCC, 2019a)

Cette approche réglementaire s'appuie sur des exigences annuelles de réduction et de limites d'intensité carbonique, exprimées toutes deux en grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par mégajoule (g d'éq. CO<sub>2</sub>/MJ). Les réductions annuelles tiendront compte des émissions de GES générées sur tout le cycle de vie du carburant. Elles s'appliqueront à tous les combustibles alors que les limites d'intensité seront spécifiques à chaque carburant liquide, tel que montré au tableau 3.1. (ECCC, 2019a)

**Tableau 3.1 : Exigences de réduction et limites annuelles d'intensité en carbone** (tiré de : ECCC, 2019a)

Année	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030 et après
<b><i>Exigence de réduction annuelle de l'intensité en carbone (g éq. CO<sub>2</sub> par MJ)</i></b>									
<b>Tous les combustibles</b>	3,6	4,4	5,2	6,0	6,8	7,6	8,4	9,2	10,0
<b><i>Limites annuelles de l'intensité en carbone (valeur moyenne d'intensité en carbone du cycle de vie au Canada – exigence de réduction de l'intensité en carbone)</i></b>									
<b>Essence</b>	88,4	87,6	86,8	86,0	85,2	84,4	83,6	82,8	82,0
<b>Diesel</b>	96,4	95,6	94,8	94,0	93,2	92,4	91,6	90,8	90,0
<b>Kérosène</b>	84,4	83,6	82,8	82,0	81,2	80,4	79,6	78,8	78,0
<b>Mazout léger</b>	80,4	79,6	78,8	78,0	77,2	76,4	75,6	74,8	74,0
<b>Mazout lourd</b>	95,4	94,6	93,8	93,0	92,2	91,4	90,6	89,8	89,0

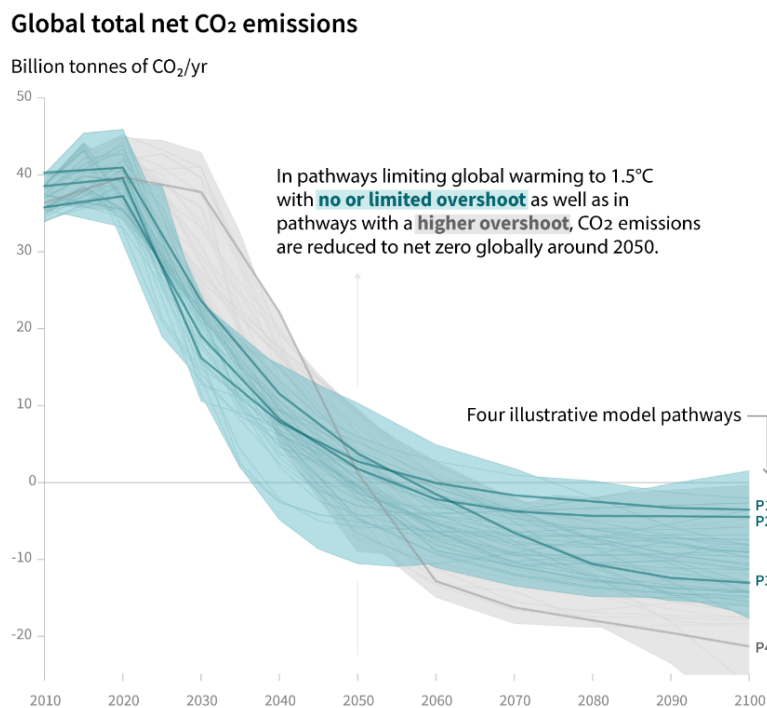
À partir de 2022, ces limites annuelles obligeront les raffineurs et importateurs d'essence à diminuer leur intensité carbonique. (Boag, 2019) Ces réductions et limites d'intensité se feront de plus en plus strictes avec les années et devraient permettre une réduction d'environ 11 % d'ici 2030 par rapport à 2005. Ces exigences de réduction sont prévues de plafonner à 10 g d'éq. CO<sub>2</sub>/MJ à partir de 2030. (ECCC, 2019a)

Essentiellement, il s'agit d'un MBM fondé sur le même principe que le programme CORSIA. Les fournisseurs de combustibles fossiles produiront des quantités excédentaires annuelles d'équivalent carbone selon une quantité d'énergie (MJ). Ces excédents correspondent à leur obligation de conformité en intensité carbonique. Chaque excédent d'équivalent carbone correspond à une tonne équivalente de CO<sub>2</sub> qui devra ainsi être compensée par l'achat d'un crédit. Les parties non assujetties à la NCP pourront participer de manière à générer des crédits volontaires. (ECCC, 2017b; ECCC, 2018b) Par cette approche réglementaire, le Canada est le premier pays à réguler l'intensité carbonique des combustibles fossiles. (Boag, 2019)

La norme s'appliquera à « quiconque produit, importe et, dans certains cas, distribue des combustibles fossiles au Canada ». En revanche, la NCP ne sera pas applicable au carburant utilisé pour les vols internationaux. (ECCC, 2017b; ECCC, 2018b) L'applicabilité aux vols domestiques, quant à elle, semble nébuleuse pour le moment. La publication du règlement en 2020 devrait clarifier cette information.

#### 4. CIBLES ENVIRONNEMENTALES EN MATIÈRE DE RÉDUCTION DE GES DANS LE DOMAINE DE L'AVIATION CIVILE

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il est encore possible de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C depuis l'ère préindustrielle. Toutefois, afin d'atteindre cet objectif, les émissions mondiales doivent rapidement plafonner d'ici 2030 pour ensuite diminuer drastiquement jusqu'à la carboneutralité vers 2050 (figure 4.1). Par la suite, le bilan carbone de la planète doit être négatif, c'est-à-dire qu'il faudra retirer davantage de GES qu'il n'en est émis. (GIEC, 2018) Pour ce faire, plusieurs méthodes peuvent être utilisées dont la capture et la séquestration du carbone. À noter que, dans ce contexte, le terme « carbone » fait référence au « CO<sub>2</sub> ». Cette technologie permet de capturer et piéger les molécules de CO<sub>2</sub> pour ensuite les stocker dans des puits de carbone afin d'éviter qu'elles ne se retrouvent dans l'atmosphère. (GIEC, 2005) Ces puits de carbone représentent des réservoirs naturels ou artificiels pouvant retirer le CO<sub>2</sub>. À titre d'exemple, les forêts, en séquestrant le CO<sub>2</sub> dans l'air par l'absorption via la photosynthèse, sont des puits de carbone naturels. (GIEC, 2018) Le CO<sub>2</sub> possède plusieurs usages et peut même être réutilisé, une fois capté. Sa transformation en biocarburant en est un exemple et sera discutée plus en détail au chapitre 6.



**Figure 4.1 : Scénarios limitant le réchauffement planétaire à 1,5 °C** (tiré de : GIEC, 2018)

Afin d'entreprendre ce virage, il est primordial d'instaurer une collaboration mondiale pour que chaque pays soit sollicité et puisse participer à l'atteinte de cet objectif. Mais comment se positionne le secteur aérien par rapport à cette situation? Les mesures prises par l'OACI et le Canada sont-elles en adéquation avec l'Accord de Paris? Ce chapitre vise à évaluer les moyens mis en place pour limiter l'empreinte carbone de l'aviation civile canadienne et internationale dans le contexte d'urgence climatique. Pour ce



faire, les objectifs de l'OACI ainsi que ceux du Canada seront mis en perspective avec l'Accord de Paris. Par la suite, les engagements du Canada seront comparés à ceux d'autres pays du G20. Il sera également question d'explorer quelles mesures sont mises en place actuellement à travers le monde. Finalement, l'aviation civile sera comparée à d'autres moyens de transport afin de mettre en perspective sa performance en matière de réduction d'émissions de GES.

#### **4.1 Échelle internationale**

L'aviation civile souhaite atteindre une croissance neutre des émissions de CO<sub>2</sub> à partir de 2020 en plus de réduire ses émissions absolues de moitié d'ici 2050 par rapport au niveau de 2005. Ces cibles sont-elles en ligne avec celles de l'Accord de Paris? L'industrie prétend que ses objectifs concordent avec le scénario limitant le réchauffement climatique à 2 °C. (ATAG, 2019) Comme le rapporte le GIEC pour ce scénario, les émissions de GES doivent diminuer de 50 % à 80 % d'ici 2050 par rapport au niveau de 2010. (GIEC, 2018) L'objectif de réduction absolue des émissions de l'industrie aérienne semble ainsi s'arrimer aux cibles de l'Accord de Paris. Cependant, comme il a été mentionné au chapitre 2, il est légitime de remettre en question l'atteinte de cet objectif puisque pour maintenir une croissance neutre de 2020 à 2050, il faudrait que la quasi-totalité du carburant soit remplacée par les biocarburants (OACI, 2019d). Les efforts de l'industrie devraient donc être colossaux afin d'atteindre une réduction nette des émissions de moitié d'ici 2050.

Dans le même ordre d'idées, on peut reconsidérer les affirmations de l'industrie qui prétendent respecter l'Accord de Paris en s'interrogeant le fondement du programme CORSIA de même que le principe de croissance neutre. Le programme a pour but de compenser les émissions excédentaires au-delà du seuil de 2019-2020. Toutefois, dans le contexte d'urgence climatique actuel, il est impératif de réduire de manière globale les émissions de GES, ce qui laisse ainsi sous-entendre que, pendant la période où CORSIA sera en fonction (prévue pour 2021 à 2035), d'autres secteurs écoperont de ces réductions pour lesquelles l'industrie aérienne est en fait responsable (Korber Gonçalves, 2017). En effet, pendant que celle-ci compensera ses émissions pour contrebalancer sa croissance, il faudra bien que d'autres industries se chargent de réduire leurs émissions pour qu'à l'échelle mondiale celles-ci diminuent selon les objectifs de l'Accord de Paris.

De plus, dans la perspective de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C ou 2 °C par rapport au niveau préindustriel d'ici 2100, le concept de « budget carbone » est couramment utilisé. Cette notion permet d'estimer la quantité d'équivalents CO<sub>2</sub> qu'il est permis d'émettre avant d'atteindre un certain seuil, ici fixé à 1,5 °C ou 2 °C. Ce budget se base sur ce qui a déjà été émis depuis l'ère préindustrielle. D'année en année, la planète consomme une part supplémentaire de ce budget. (Hausfather, 2018, 9 avril) Selon les études, la valeur du budget carbone restant varie. En effet, un certain nombre de facteurs et d'hypothèses peuvent influencer de façon significative les résultats, c'est pourquoi les études ne peuvent être

comparées directement les unes aux autres. La manière de définir l'ère préindustrielle, période de référence, affecte le budget tout comme la probabilité d'atteindre le seuil fixé. Le GIEC, par exemple, élabore ses projections en considérant qu'une situation est « probable » lorsque les probabilités sont supérieures à 66 % alors que pour l'Agence internationale de l'énergie, cette définition correspond habituellement à une probabilité de 50 %. Certaines études peuvent également ne se concentrer que sur les effets du CO<sub>2</sub> alors qu'en réalité d'autres gaz, comme le méthane, les oxydes nitreux et les chlorofluorocarbures, contribuent aussi au réchauffement climatique de façon importante. (Sussams, 2018) De plus, il existe une autre source d'incertitude quant à la quantité de méthane qui pourrait être relâchée dans l'atmosphère à la suite de la décongélation du pergélisol. (GIEC, 2018) Tous ces facteurs, mis ensemble, font en sorte que les résultats peuvent varier significativement d'une étude à une autre.

Quoi qu'il en soit, selon le GIEC, le budget carbone disponible à partir du début de 2018 s'élève à environ 580 Gt pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C avec un niveau de confiance de 50 %. Cette valeur diminue à 420 Gt si on veut obtenir une assurance de 66 %. (Rogelj et Forster, 2019, 17 juillet; GIEC, 2018). Un article publié dans *Carbon Brief* estime qu'entre 2015 et 2050, l'industrie aérienne pourrait générer un total cumulatif de 56 Gt d'émissions de CO<sub>2</sub> ou, au mieux, 42 Gt selon un scénario optimiste impliquant des réductions importantes provenant des améliorations technologiques et opérationnelles (Pidcock et Yeo, 2016, 8 août). Dès lors, cette proportion, qui ne couvre que la première moitié du siècle, représente près de 10 % du budget carbone restant. En supposant que les émissions du secteur augmenteront au même rythme que le trafic aérien, il est évident que celui-ci pourrait consommer une part majeure du budget carbone si des mesures adéquates ne sont pas mises en place. Bref, considérant que l'aviation internationale prévoit compenser ses émissions de CO<sub>2</sub> plutôt que de les réduire et qu'elle pourrait occuper une proportion non négligeable du budget carbone, il est difficile de croire que les objectifs de secteur puissent respecter l'Accord de Paris.

## **4.2 Échelle nationale**

L'Accord de Paris représente une entente internationale, mais dont les cibles de réduction sont individuelles aux pays (Chalifour et Besco, 2018). C'est par le biais de leurs contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN) que les pays doivent tenter d'atteindre leurs objectifs de réduction. Pour le Canada, le défi consiste à diminuer ses émissions de GES de 30 % d'ici 2030 par rapport au niveau de 2005. Celles-ci s'élevaient alors à près de 750 Mt d'éq. CO<sub>2</sub>, il faut donc que les émissions de GES du Canada atteignent environ 525 Mt d'éq. CO<sub>2</sub> d'ici 10 ans pour atteindre la cible. (ECCC, 2017a) Rappelons que les émissions globales au Canada atteignaient 716 Mt encore en 2017. Il reste ainsi encore beaucoup de travail à faire si on veut respecter les objectifs de l'Accord de Paris.

À mesure que les années passent, on remarque que les projections gouvernementales liées aux émissions de GES en 2030 se font de plus en plus optimistes comme il est possible de le constater à la

figure 4.2. En 2016, publiées dans le 2<sup>e</sup> rapport biennal du Canada, les prévisions pour 2030 s'élevaient à 815 Mt selon les mesures mises en place à ce moment-là (ligne rouge) (ECCC, 2016). Elles diminuent ensuite à 701 Mt d'après le scénario de référence de 2018 (ligne bourgogne) du rapport de projection des émissions de GES du Canada. Ce scénario est basé sur les mesures et politiques fédérales, provinciales et territoriales déployées en septembre 2018. (ECCC, 2018c)

Le deuxième scénario, « avec mesures supplémentaires » (ligne verte), inclut les mesures et politiques annoncées par le gouvernement, mais qui ne sont pas encore pleinement mises en place. Celles-ci impliquent notamment le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (CPC) dans lequel le gouvernement semble placer beaucoup d'espoir comme il a été discuté au chapitre précédent. Une fois déployées, ces mesures « supplémentaires » devraient ainsi permettre au pays de réduire ses émissions de GES à 616 Mt pour 2030. Ce scénario « avec mesures supplémentaires » tient compte du retrait de l'Ontario du système législatif de plafonnement et d'échange, mais aussi du secteur de l'Affectation des terres, des changements d'affectation des terres et de la foresterie (ATCATF). (ECCC, 2018c) L'ATCATF permet de comptabiliser les émissions et absorptions de CO<sub>2</sub> liées à la biomasse et à la matière organique des sols. La conversion de terres agricoles en terres urbanisées, les changements de pratiques agricoles et l'évolution des terres forestières sont des activités qui influencent la concentration de CO<sub>2</sub> présent dans l'air. (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique, 2017) Ainsi, pour la première fois, le gouvernement a inclus la contribution du secteur de l'ATCATF dans ses prévisions pour 2030. Celui-ci affirme que cette contribution pourrait permettre de sauver 24 Mt supplémentaires au scénario « avec mesures supplémentaires » en menant les projections à 592 Mt (point vert foncé). (ECCC, 2018c)

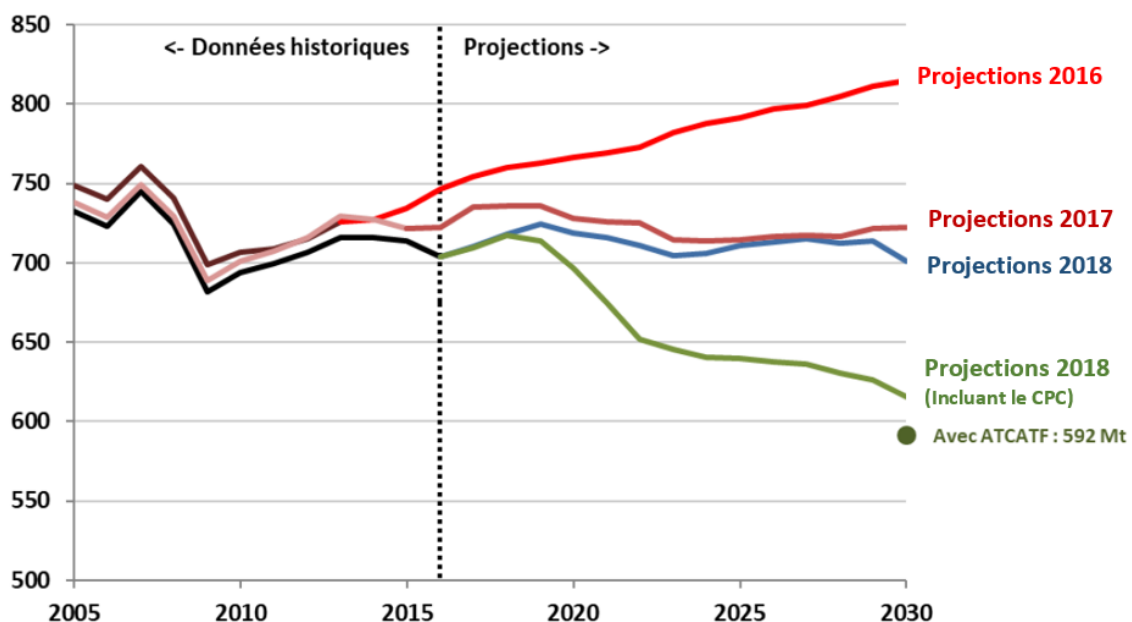
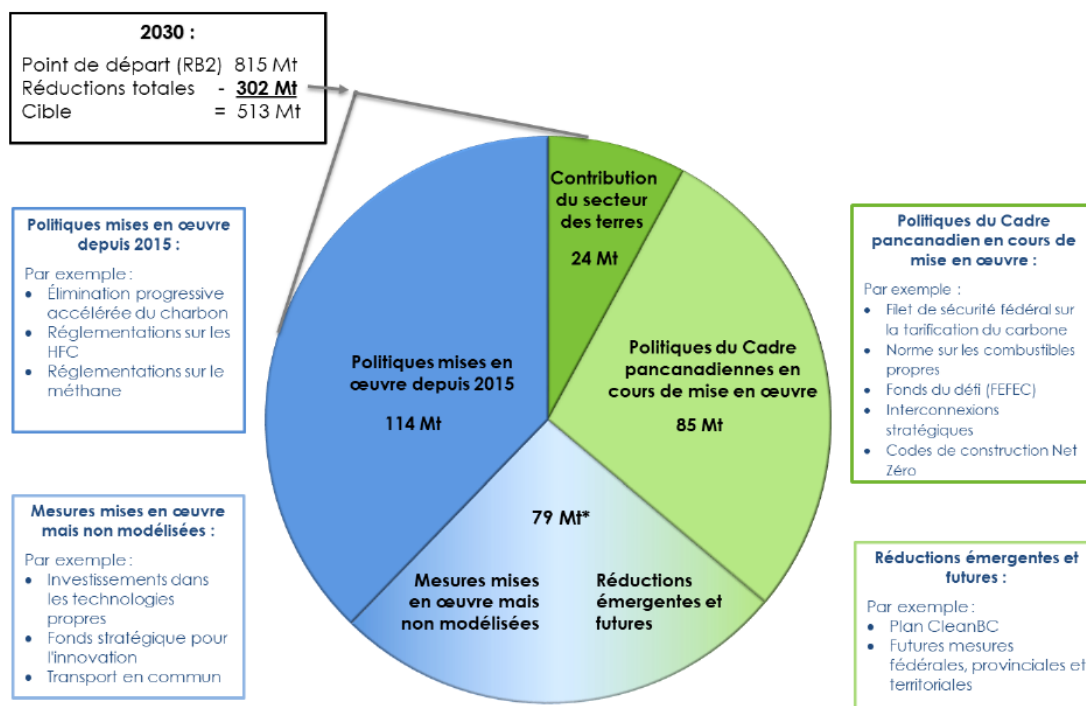


Figure 4.2 : Projections d'émissions de GES au Canada d'ici 2030 (tiré de : ECCC, 2018c)

Ces projections représentent une réduction des émissions de GES de 17 % par rapport à 2017 et s'étalent sur une dizaine d'années seulement. Est-ce réellement possible sachant qu'entre 2005 et 2017, le Canada ne les a diminuées que de 2 % seulement? Le gouvernement fédéral prétend que oui. Pour appuyer sa position, il a publié en 2018 le dernier rapport des projections des émissions de GES qui montre la répartition attendue de ces réductions d'ici 2030 (figure 4.3). Il est possible de remarquer qu'une proportion importante, soit près de 26 %, est attribuée à des réductions émergentes et futures, comme le Plan *CleanBC* de la Colombie-Britannique, dont le niveau d'incertitude peut être considéré comme élevé puisque ces mesures pourraient ne pas se concrétiser. De plus, la contribution du secteur ATCATF est aussi une source d'incertitudes puisque c'est la première fois qu'elle est considérée dans le modèle de prévision. Il n'y a donc aucune donnée permettant de valider que les estimations soient bonnes.



\* : L'augmentation par rapport aux projections de 2017 s'explique par la mise à jour des données sous-jacentes et des tendances économiques (+7 Mt) et par la révision de l'objectif provincial (+30 Mt) de l'Ontario, contrebalancée par la contribution du secteur d'Affectation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (-24 Mt).

**Figure 4.3 : Détails des réductions d'émissions de GES d'ici 2030** (tiré de : ECCC, 2018c)

D'un autre côté, publié en mars 2018, le rapport collaboratif des vérificateurs généraux brosse un portrait moins optimiste de la situation au pays. Ce rapport vise à déterminer si le gouvernement du Canada et les gouvernements provinciaux et des territoires ont respecté leurs engagements en termes de réduction d'émissions de GES.

De façon générale, « la plupart des gouvernements au Canada n'étaient ni en voie de respecter leurs engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre, ni prêts à faire face aux impacts d'un climat en constante évolution » (Saher et al., 2018). Les vérificateurs généraux en viennent à la

conclusion que le Canada n'atteindra pas sa cible de 2020 découlant de l'Accord de Copenhague et que, pour atteindre les objectifs de 2030, des efforts considérables devront être déployés pour aller au-delà des mesures actuelles mises en place. De manière plus détaillée, au moins la moitié des provinces et territoires du Canada n'ont toujours pas de cibles de réduction pour 2030 (Tableau 4.1 tableau 4.1). Le rapport fait également le constat que les différents gouvernements ont utilisé des années de références et des types de cibles différentes. Certaines provinces ont opté pour des cibles globales alors que d'autres ont établi des cibles pour des secteurs économiques spécifiques. Pour ces motifs, il est ardu de déterminer comment les stratégies de réduction provinciales peuvent contribuer à l'atteinte de la cible fédérale de 2030. (Saher et al., 2018)

**Tableau 4.1 : Cibles de réduction des gouvernements provinciaux et territoriaux** (tiré de : ECCC, 2018c)

Province/Territoire	Cible en 2020	Cible en 2030	Cible en 2050
Terre-Neuve-et-Labrador			De 75 à 85% sous les niveaux de 2001
Île-du-Prince-Édouard		30% sous les niveaux de 2005	
Nouvelle-Écosse	10% sous les niveaux de 1990	De 45% à 50% sous les niveaux de 2005	
Nouveau-Brunswick	14.8 Mt	10.7 Mt	5 Mt
Québec	20% sous les niveaux de 1990	37.5% sous les niveaux de 1990	De 80% à 95% sous les niveaux de 1990
Ontario		30% sous les niveaux de 2005	
Manitoba	Aucune cible provinciale		
Saskatchewan	Aucune cible provinciale <sup>44</sup>		
Alberta	Aucune cible provinciale		
Colombie-Britannique		40% sous les niveaux de 2007	80% sous les niveaux de 2007
Nunavut	Aucun objectif territorial annoncé		
Yukon	Opérations gouvernementales neutres en carbone <sup>45</sup>		
Territoires du Nord-Ouest	Aucun objectif territorial		

<sup>44</sup> Bien que la Saskatchewan n'ait pas d'objectif global d'émission de GES, il a des objectifs spécifiques à l'industrie. Électricité – 40% sous les niveaux de 2005 d'ici 2030.

Émissions de méthane de pétrole et de gaz en amont – 40% sous les niveaux de 2015 d'ici 2025.

Grands émetteurs industriels – réduction de l'intensité de 10% d'ici 2030.

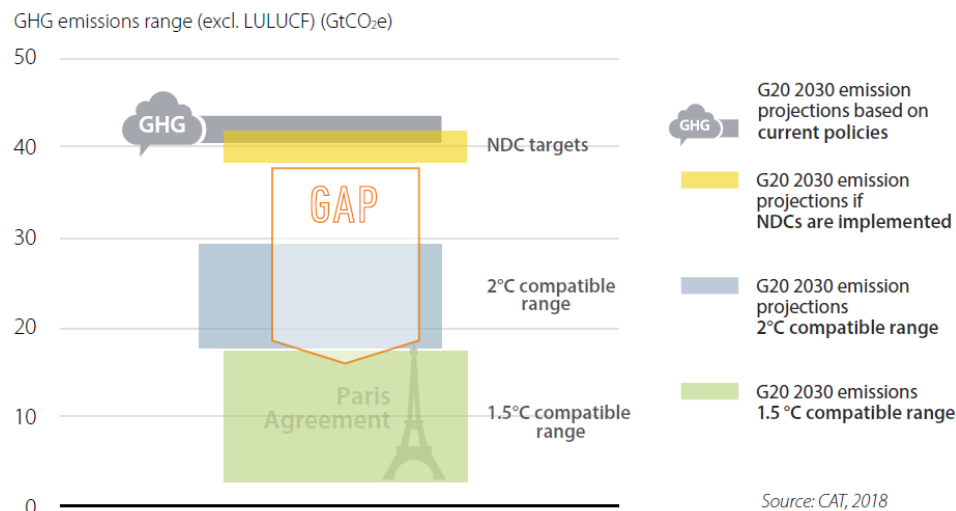
<sup>45</sup> L'objectif de neutralité carbone de 2020 pour les opérations gouvernementales changera probablement.

À sa défense, la ministre de l'Environnement, Mme McKenna, a rapporté que ce rapport faisait état du passé et qu'il ne tenait pas compte du CPC récemment élaboré par le gouvernement Libéral. (McKenzie, 2018) Encore faut-il obtenir la collaboration des provinces pour permettre la mise en place du CPC. À cet égard, quelques provinces dont l'Alberta, la Saskatchewan et l'Ontario ont déjà montré des réticences face à la stratégie nationale. Il plane ainsi un niveau d'incertitude quant à l'adoption réussie du CPC à l'échelle du pays. Ces réserves pourraient rendre plus difficile sa mise en place. Il est pertinent de rappeler que, selon les projections gouvernementales, le CPC, qui inclut rappelons-le la Norme sur les combustibles propres (NCP), devrait être à l'origine de près de 30 % des réductions d'émissions de GES

comme le rapporte la figure 4.3. L'adoption d'un plan pancanadien ne garantit en rien sa réussite et sa mise en pratique. Quoi qu'il en soit, cette initiative canadienne est tout de même soulignée dans plusieurs rapports tels que le *State and Trends of Carbon Pricing 2019*, le *Emission Gap Report 2019* et le *G20 Brown to Green Report* réalisés respectivement par la Banque mondiale, les Nations unies et l'organisme *Climate Transparency* (Banque mondiale, 2019; ONU, 2019b; Climate transparency, 2018).

### 4.3 Engagements du Canada en comparaison à d'autres pays industrialisés

Paru en 2018, le rapport *Brown to Green*, élaboré par le groupe *Climate Transparency* et de nombreux partenaires, a pour but d'évaluer les efforts des pays du G20 dans la transition énergétique. À noter que les pays du G20 représentent 79 % des émissions globales de GES. Les conclusions du rapport sont pour le moins alarmantes. Effectivement, les CPDN des pays mèneraient à un réchauffement de 3,2 °C et aucun des pays du G20 ne possède des CPDN compatibles avec l'Accord de Paris tel que démontré à la figure 4.4. En moyenne, 82 % des sources d'énergie des pays du G20 proviennent toujours des énergies fossiles alors qu'au Canada, cette proportion a même augmenté entre 2012 et 2017. (Climate transparency, 2018)



**Figure 4.4 : Écart entre les cibles CPDN et la limite de 1,5 °C selon l'Accord de Paris** (tiré de : Climate Transparency, 2018)

Partant de ce constat, il est légitime de se demander comment se classe le Canada par rapport au reste du monde dans la lutte contre les changements climatiques. Selon le *Climate action tracker*, un organisme indépendant de scientifiques responsables de la surveillance des actions politiques relatives au climat dans le but d'évaluer leur consistance avec l'Accord de Paris, les CPDN actuellement en place au Canada mèneraient à un réchauffement climatique de 2 °C à 3 °C. Ceux-ci sont donc incompatibles avec les cibles de l'Accord de Paris. Par ailleurs, si tous les pays devaient suivre l'approche canadienne, cela occasionnerait une augmentation de température allant de 3 °C à 4 °C. (Climate action tracker, 2019)

#### 4.3.1 Mesures mises en place à l'international dans le domaine de l'aviation

Il apparaît ainsi que les engagements du Canada en matière de réduction de GES ne sont pas suffisants pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Qu'en est-il, plus précisément, dans le secteur aérien? On constate rapidement que le moyen le plus couramment utilisé par une majorité de pays est l'imposition d'une taxe (Annexe 2). Par exemple, la Norvège a adopté une taxe sur les passagers aériens en 2016. Cette taxe s'applique aux passagers en partance d'un aéroport norvégien et varie selon la destination. Les vols intra-européens possèdent une taxe à valeur plus faible (environ 11 \$ CA) que les destinations internationales externes à l'Europe (environ 29 \$ CA). (FCC Aviation, s.d.) Le gouvernement français, lui, a annoncé cet été qu'une écotaxe sur les billets d'avion s'appliquerait d'ici 2020. Celle-ci s'élèvera entre 2,2 \$ CA à 26,1 \$ CA et dépendra de la destination finale comme pour la Norvège. (Breteau, 2019, 11 juillet) Ces mesures visent à internaliser les coûts associés aux impacts environnementaux du transport aérien. Cependant, il ne faut pas croire que toutes les taxes sont adoptées dans une perspective environnementale. L'Australie possède, depuis 1995, la taxe *Passenger Movement Charge* applicable à toute personne quittant le pays via le transport aérien international ou le transport maritime. Initialement adoptée afin de couvrir les frais liés aux activités frontalières, celle-ci a subi depuis plusieurs augmentations pour différentes raisons, mais aucune d'entre elles ne fait mention de l'environnement. Elle représente de nos jours une des taxes de départ les plus élevées dans le monde (environ 55 \$ CA). (Tourism & Transport Forum Australia, 2013; Australian border force, 2018) Mais ces mesures sont-elles efficaces? Le secteur aérien est-il suffisamment taxé? Quels types de taxes peuvent être appliqués? Ces questions seront plus amplement discutées dans le prochain chapitre sur la tarification du carbone.

Un autre moyen de limiter les émissions de GES du transport aérien pourrait être d'augmenter la proportion de carburants alternatifs utilisés par les compagnies aériennes. Dans le secteur du transport routier, plusieurs pays européens ont déjà mis en place des quotas de biocarburants. De façon parallèle, cette mesure pourrait aussi être appliquée aux aéronefs. C'est d'ailleurs ce que compte faire la Norvège dès le 1<sup>er</sup> janvier 2020. Le gouvernement a annoncé en 2018 que les compagnies aériennes devront mélanger 0,5 % de carburant alternatif au carburant conventionnel. Le biocarburant devra notamment, provenir de déchets ou de résidus. L'objectif consiste à atteindre une proportion de 30 % d'ici 2030. La Norvège est ainsi un des premiers pays à adopter un tel requis pour le secteur de l'aviation. Or, pour le moment, les biocarburants sont encore bien dispendieux, de deux à trois fois le prix des carburants conventionnels. Le marché est aussi jeune et peu développé, ainsi les SAF ne sont encore produits qu'en faibles quantités. (Karagiannopoulos et Solsvik, 2018, 4 octobre; Ministère du Climat et de l'Environnement de la Norvège, 2019) Considérant ces obstacles, qui seront développés plus en détail au chapitre 6, on peut se demander si la mise en place d'une telle mesure est réaliste? Saura-t-elle, au contraire, stimuler le marché nordique et créer ainsi une demande plus stable? Quoi qu'il en soit, une fois l'initiative lancée en Norvège, ce ne sera qu'une question de temps afin de voir si d'autres pays emboîteront le pas...

#### 4.4 Engagement de l'aviation civile en comparaison avec d'autres secteurs

Afin de mettre en perspective la performance du secteur aérien en termes de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>, il est pertinent de le comparer avec d'autres industries. À l'échelle internationale, le transport maritime sera abordé puisqu'il opère dans un contexte similaire à celui de l'aviation civile. À l'échelle nationale, le transport ferroviaire et routier seront discutés puisqu'ils relèvent, du moins partiellement, du gouvernement fédéral au même titre que l'aviation domestique.

##### 4.4.1 Comparaison à l'échelle internationale avec le transport maritime

Sur la scène internationale, un seul autre secteur, tel que l'aviation civile, relève d'une entité de l'ONU : le transport maritime international. Effectivement, la responsabilité du secteur à diminuer ses impacts environnementaux a été attribuée à l'Organisation maritime internationale (OMI) comme cela a été remis à l'OACI pour le secteur aérien. Il est ainsi facile d'établir des comparaisons entre les deux secteurs comme le résume le tableau 4.2.

**Tableau 4.2 : Comparaison entre secteur aérien et maritime** (compilation d'après : OACI, 2019d; Organisation maritime internationale [OMI], 2014; OMI, 2019)

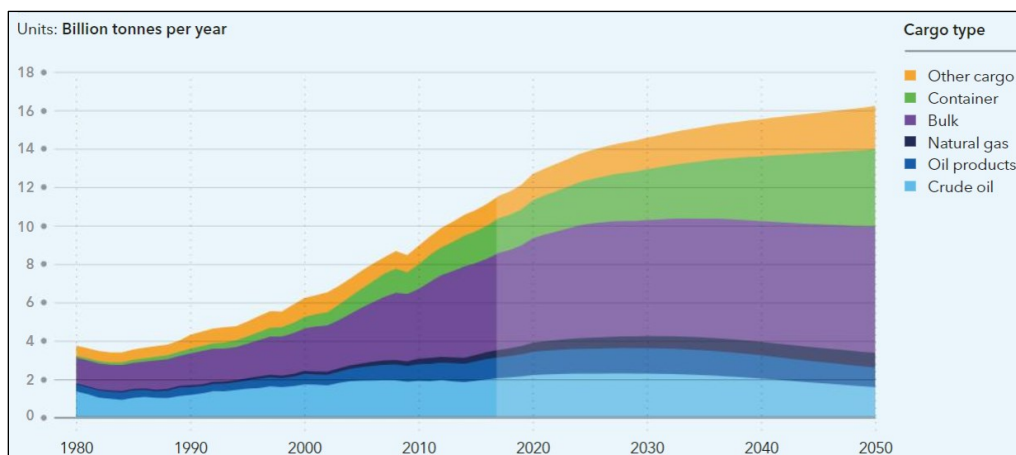
Secteur	Contribution aux émissions mondiales	Projections des émissions pour 2050	Cibles environnementales pour 2050	Mesures en voie d'être mises en place
Aviation civile internationale	2,5 %	Augmentation de 200 % à 300 %*	Réduction de 50 % des émissions par rapport à 2005	Programme CORSIA
Transport maritime international	3 %	Augmentation de 50 % à 250 %**	Réduction de 50 % des émissions par rapport à 2008	Règlement OMI 2020

\* Par rapport à 2015

\*\* Par rapport à 2012

Leur contribution aux émissions mondiales est similaire. Selon l'OMI, le transport maritime est responsable d'environ 3 % des émissions globales. Les deux secteurs sont également portés à croître de façon importante d'ici 2050, mais de façon différente. (OMI, 2014) Comme on peut le constater à la figure 4.5, la croissance du secteur maritime semblerait se stabiliser avec les années selon les projections de DNV GL, une compagnie œuvrant dans l'industrie (DNV GL, 2017) alors que les projections du secteur aérien laissent présager une croissance exponentielle de la demande en fonction du temps. Ces projections sont basées sur un scénario de *business as usual*, incluant, pour le secteur aérien, le renouvellement des flottes avec des avions plus performants. (OACI, 2019d) En comparant ainsi, dans le tableau 4.2, les projections de 2050 de ces deux secteurs avec leurs cibles environnementales respectives, il est possible de constater l'ampleur du défi auquel ces industries doivent faire face.





**Figure 4.5 : Projections du commerce maritime international vs d'ici 2050** (tiré de : DNV GL, 2017)

Au niveau environnemental, l'industrie maritime rejette des émissions de CO<sub>2</sub> responsable du réchauffement climatique, mais aussi des polluants atmosphériques tels que des oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) qui contribuent notamment aux pluies acides et à l'acidification des océans. Ces sulfures proviennent principalement de la combustion du carburant et sont rejetés en teneur plus élevée que dans le secteur routier. (Harvey, 2019, 14 mai; OMI, 2014)

En 2008, l'industrie maritime a élaboré une version initiale d'une stratégie pour réduire les émissions de GES des navires qui vise, entre autres, leur réduction de moitié d'ici 2050. Cette stratégie a aussi pour objectif de diminuer l'intensité carbonique des émissions en améliorant l'efficacité énergétique des nouveaux navires basée sur l'indice nominal de rendement énergétique. (OMI, 2018) Cet indice est une norme, approuvée en 2011, servant à réguler la conception des nouveaux bateaux entrant en service depuis 2013 pour améliorer leur efficacité énergétique. (Transport & Environment, s. d.) Cette norme devrait permettre aux nouvelles constructions de bateaux, d'ici 2025, d'être 30 % plus efficaces que ceux construits en 2014. De façon parallèle, ce standard peut s'apparenter à la nouvelle norme sur le CO<sub>2</sub> du secteur aérien qui, cependant, ne s'appliquera qu'à partir de 2020. Bien qu'initialement élaborée en 2008, la stratégie de réduction d'émissions de GES du secteur maritime n'a été qu'adoptée qu'en avril 2018. (OMI, 2018) En plus de cette stratégie, l'OMI compte adopter un règlement pour contrôler la teneur en sulfures des carburants dans le but de réduire la concentration des rejets en sulfures de 3,5 % à 0,5 %. Celui-ci prendra effet dès le 1<sup>er</sup> janvier 2020 et s'appliquera à tous les bateaux qu'ils soient dédiés au transport domestique ou international. (OMI, 2019)

L'OMI fait également face à une pression sociale, ces derniers temps, afin d'adopter une réglementation réduisant la vitesse des bateaux. Effectivement, cette mesure simple pourrait permettre de grandes économies en carburant. Une réduction de la vitesse d'environ 12 nœuds (près de 22 km/h) diminuerait la consommation d'essence de 18 % à 30 %. Dernièrement, lors du G7 qui a lieu à Biarritz, la France a

notamment suggéré cette solution à l'organisation maritime internationale. (Dancer, 2019, 9 octobre)  
Jusqu'à présent, aucun consensus à ce sujet de la part de l'OMI. (Bannon, 2019)

Il est ainsi possible d'établir certains parallèles entre l'aviation civile et le transport maritime international. Les deux industries ont réagi sensiblement au même moment (2008-2009) afin de se fixer des objectifs environnementaux similaires. En effet, chaque secteur vise une réduction de moitié de ses émissions d'ici 2050. Toutefois, l'année de référence diffère, ce qui suppose que l'OMI est légèrement plus ambitieuse que l'OACI, mais en réalité, l'objectif est-il plus accessible? Les objectifs de l'OMI sont probablement discutables puisqu'à part le fait d'apporter des améliorations quant à l'efficacité énergétique des nouveaux bateaux, l'industrie maritime ne semble proposer aucune autre mesure liée à la réduction d'émissions de GES. D'une part, les navires possèdent une longue durée de vie de même que pour les avions. Cette caractéristique de l'industrie maritime mène donc vers un questionnement semblable à celui de l'aviation civile : combien d'années faudra-t-il attendre avant d'atteindre un taux de renouvellement de la flotte satisfaisant respectant la nouvelle norme? D'autre part, on peut se demander pourquoi les deux industries ont attendu aussi longtemps avant de proposer des mesures concrètes? Dès 2008, à l'OMI, il était question de réduire les rejets en sulfures des bateaux (Harvey, 2019, 14 mai). Pourquoi alors le règlement n'entrera-t-il en vigueur qu'au 1<sup>er</sup> janvier prochain? La même question se pose concernant la stratégie de réduction des émissions de GES de l'OMI. Du côté de l'OACI, il a fallu attendre sept ans entre la décision d'adopter un mécanisme basé sur le marché et l'entrée en vigueur du Programme de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA) planifiée pour 2021, d'autant plus que la première phase ne sera que volontaire. Il faudra attendre en 2027 avant que CORSIA ne devienne obligatoire pour les États membres. Considérant le contexte d'urgence climatique et les croissances prononcées attendues de ces deux industries, il est légitime de remettre en question les efforts et la rapidité qu'elles ont su démontrer dans les dernières années pour faire face aux changements climatiques...

#### 4.4.2 Comparaison à l'échelle nationale avec le transport ferroviaire et routier

Sur la scène nationale, il est possible de comparer le secteur aérien canadien aux secteurs ferroviaire et routier, car ceux-ci sont sous la responsabilité du gouvernement. Le tableau 4.3 montre les quantités émises pour chaque mode de transport respectif selon le rapport d'inventaire national 2019.

**Tableau 4.3 : Émissions de GES du Canada par secteur du GIEC (Mt d'éq. CO<sub>2</sub>)** (tiré de : ECCC, 2019b)

Catégorie de GES	2005	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Transport</b>	<b>144,2</b>	<b>154,9</b>	<b>158,9</b>	<b>155,7</b>	<b>157,2</b>	<b>158,6</b>	<b>157,7</b>
Transport aérien intérieur	7,6	7,3	7,6	7,2	7,1	7,1	7,1
Transport routier	130	140	144	141	143	145	144
Transport ferroviaire	6,6	7,6	7,3	7,5	7,1	6,5	6,6

On constate que les secteurs ferroviaire et aérien intérieurs sont présents en proportions similaires en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, et ce depuis 2005. En revanche, le transport routier, représente sans équivoque le secteur le plus émetteur du pays dans la catégorie des transports. (ECCC, 2019b)

En 2018, ce sont 8,4 millions de passagers et 332 millions de tonnes de marchandises qui ont voyagé par train (Transport Canada, 2018a). La majeure partie des locomotives de marchandises fonctionnent grâce à des moteurs diesels-électriques qui relâchent ainsi des émissions de GES (Neufeld et Massicotte, 2017). Depuis 1995, l'Association des chemins de fer du Canada possède une entente avec Transport Canada et Environnement Canada afin de surveiller les émissions des locomotives via le Programme de surveillance des émissions des locomotives. Celui-ci comporte un plan d'action qui s'étalait de 2011 à 2015 et qui a été prolongé jusqu'en 2017. (Association des chemins de fer du Canada, 2016) Toutefois, il n'a pas été possible de confirmer si une révision a été élaborée depuis. En contrepartie, le ministère des Transports a dévoilé, en 2016, un plan stratégique pour l'avenir du secteur au Canada. Celui-ci est basé sur une vision 2030 qui se décline selon cinq thèmes : l'amélioration des services pour le voyageur, le renforcement de la sécurité, le transport écologique et innovateur, la construction de corridors maritimes et la stimulation de l'économie via les corridors commerciaux. En regardant de plus près le thème de l'écologie, le gouvernement reprend l'objectif national de réduire les émissions de GES de 30 % d'ici 2030 par rapport à 2005. (Transport Canada, 2016) Cependant, aucune indication sur comment le gouvernement compte atteindre sa cible. Il est vrai qu'un plan stratégique ne comporte que des orientations, c'est pourquoi, habituellement, il est accompagné d'un plan d'action. Celui-ci s'avère néanmoins absent.

Le gouvernement ne semble ainsi pas avoir de mesures concrètes pour réduire les émissions de GES du secteur ferroviaire. On peut se demander également de quelle façon pourrait-il le faire puisque, comme le rapporte Transport Canada : « Personne ne fabrique de locomotives au Canada. Presque tout notre matériel est importé des États-Unis » (Neufeld et Massicotte, 2017). L'efficacité énergétique des trains échappe ainsi partiellement au contrôle du Canada. Une manière indirecte de diminuer les émissions de GES pourrait être d'inciter les gens à délaisser leur voiture au profit du train.

Le transport routier, quant à lui, se démarque facilement des autres moyens de transport puisqu'il est responsable, à lui seul, de près de 70 % des émissions du secteur. Depuis 2005, les émissions ont augmenté de près de 10 % (tableau 4.3) alors que le nombre de véhicules, lui, a connu une croissance de 37 % (ECCC, 2019b). Cela s'explique en partie par le fait que les voitures sont de plus en plus performantes. Toutefois, depuis les 20 dernières années, les Canadiens semblent délaisser leur automobile pour le véhicule utilitaire sport ou la minifourgonnette qui, eux, consomment davantage de carburant par kilomètre. Le transport de marchandises a également augmenté de façon constante depuis les années 1990, ce qui contribue aussi à la hausse des émissions. Comment le Canada compte-t-il réduire ses émissions associées au secteur routier? Il existe des normes relatives aux émissions des

automobiles et des camions lourds. Celles-ci contraignent les constructeurs à réduire les émissions de leurs véhicules dès la conception. Ces normes sont harmonisées à celles en vigueur aux États-Unis en raison des grands volumes de fret entre les pays. (Neufeld et Massicotte, 2017)

Les véhicules électriques sont aussi perçus comme faisant partie de la solution. Selon le rapport du 3<sup>e</sup> trimestre de 2019 de Mobilité électrique Canada, les véhicules à émission zéro ont atteint 3,5 % des ventes avec une proportion de 10 % en Colombie-Britannique et 7 % au Québec. (Mobilité électrique Canada, 2019) Le ministre des Transports a d'ailleurs annoncé en 2019 les nouvelles cibles pour le Canada en termes de véhicules à émission zéro. Cette proportion doit atteindre 10 % des ventes de véhicules légers d'ici 2025 et 30 % d'ici 2030 pour finalement culminer à 100 % en 2040. (Transport Canada, 2018a) Cependant, il ne faut pas voir la voiture électrique comme la solution magique. Son étape de fabrication fait en sorte que son empreinte environnementale n'est pas aussi attrayante qu'elle en a l'air. Il faut également considérer quelle source d'énergie produit l'électricité. En effet, plusieurs pays dont la Chine, l'Inde et les États-Unis sont encore très dépendants au charbon afin de produire leur électricité. (Gerbet, 2019, 16 janvier)

On rapporte aussi que les études s'intéressent surtout aux émissions de CO<sub>2</sub> alors que d'autres indicateurs devraient être de même considérés. L'apport en métaux dans la fabrication d'une voiture électrique, tels que le cuivre et parfois le nickel, est plus élevé que pour un véhicule conventionnel ce qui peut causer des effets indésirables sur la santé humaine. Une augmentation importante du nombre de voitures électriques entraînerait par le fait même une grande pression sur les réseaux électriques existants. Cela pourrait se révéler être un problème si les infrastructures déjà existantes ne sont pas en mesure de fournir à la demande supplémentaire. (Gerbet, 2019, 16 janvier) La solution ne se trouve donc pas nécessairement dans la voiture électrique, mais plutôt dans la réduction du nombre de véhicules en circulation.

Pour conclure, il s'avère que tous les secteurs du transport misent sur les progrès technologiques pour réduire leur empreinte carbone, mais la question persiste : est-ce que ce sera suffisant pour atteindre les objectifs? Pour le secteur aérien, il a déjà été validé que ce ne serait pas possible, c'est pourquoi l'OACI a mis en place un panier de mesures additionnelles. Pour le secteur maritime, cela semble moins évident. L'industrie maritime est également confrontée à d'autres problèmes, hormis les émissions de CO<sub>2</sub>, comme les rejets en soufre. L'OMI doit ainsi attaquer plusieurs fronts à la fois tandis que l'OACI ne se concentre, pour le moment, que sur les émissions de CO<sub>2</sub>, ce qu'on lui reproche d'ailleurs parfois (Agence France-Presse, 2019). Quoi qu'il en soit, les industries du transport aérien et maritime à l'échelle internationale évoluent de façon semblable dans leur lutte contre les changements climatiques. Elles possèdent des cibles similaires dont l'atteinte paraît difficile. En contrepartie, l'OACI semble avoir un plan plus détaillé que l'OMI même si la faisabilité n'en demeure pas moins incertaine. Au Canada, on tente de réduire les émissions de GES liées au secteur des transports en misant sur l'électrification et le

resserrement des normes même si le principal problème demeure le nombre de voitures en circulation. La réduction des émissions de GES est aussi couverte par le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (CPC) qui prévoit l'introduction de la taxe carbone à l'échelle nationale et de la Norme sur les combustibles propres qui devrait inciter à réduire l'intensité carbonique des carburants. Ainsi, de façon générale, l'OMI et l'OACI, de même que le gouvernement du Canada, se sont fixés des cibles de réductions ambitieuses dont l'atteinte demandera des efforts considérables.

## **5. TARIFICATION DU CARBONE POUR LE SECTEUR AÉRIEN ET APPLICABILITÉ AU CANADA**

Les dommages engendrés par les changements climatiques ont des répercussions économiques sur la société. La hausse des températures se manifeste partout, en particulier dans le Grand Nord canadien où le taux de réchauffement est plus élevé que la moyenne. Les phénomènes météorologiques extrêmes comme les pluies abondantes, les vagues de chaleur et les sécheresses se font de plus en plus fréquents. (ECCC, 2015) À ces événements se rattachent des coûts financiers pouvant se chiffrer à plusieurs centaines de millions de dollars. C'est sans compter les impacts sur la santé qui génèrent également des dépenses publiques. Ces répercussions sont des « externalités négatives » liées aux changements climatiques causés par l'activité humaine. Autrement dit, une externalité négative est une défaillance du marché qui survient « lorsque l'action d'un agent économique a des conséquences sur un ou des tiers qui n'est pas partie prenante de l'action ». (Santerre, 2013, février-mars) En effet, la population écope de ces coûts qui sont en fait imputables aux pollueurs, comme par exemple, le secteur aérien. Pour internaliser ces externalités, la notion du coût social du carbone, associé au CO<sub>2</sub>, est apparue. Celle-ci vise à mettre un prix sur la pollution selon le principe du pollueur-payeur afin d'inciter les gens à adopter des comportements plus respectueux de l'environnement. (Banque mondiale, s. d.; Santerre, 2013, février-mars) Ce principe affirme que tout pollueur devrait assumer les coûts des dommages causés à la santé humaine ou à l'environnement (Ward et Hicks, 2018). Dans cet ordre d'idée, les compagnies aériennes devraient être responsables des émissions qu'elles rejettent dans l'atmosphère au même titre que les industries qui déversent des contaminants dans les rivières.

Jusqu'à présent, seulement 20 % des émissions de GES mondiales (11 Gt d'éq. CO<sub>2</sub>) sont couvertes par une tarification du carbone et moins de 5 % d'entre elles sont évaluées à des prix assez élevés permettant l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris (entre 52 \$ CA et 104 \$ CA la tonne d'éq. CO<sub>2</sub> d'ici 2020 et entre 65 \$ CA et 130 \$ CA la tonne d'éq. CO<sub>2</sub> d'ici 2050). Effectivement, près de la moitié des émissions couvertes par une tarification du carbone ont un prix estimé à moins de 13 \$ CA la tonne d'éq. CO<sub>2</sub>. Les efforts ne permettent donc pas, actuellement, d'atteindre les cibles. (Banque mondiale, 2019) Malgré tout, le nombre d'initiatives nationales et internationales continue d'augmenter à travers le monde et leur portée s'étend à de nouveaux secteurs comme le transport aérien international tel qu'il le sera détaillé dans les sections suivantes.

De manière générale, il existe deux façons de mettre en place une tarification sur le carbone : la taxe sur le carbone et le marché du carbone. Ce sont donc ces deux outils économiques qui seront étudiés dans ce chapitre dans le but d'analyser leur applicabilité au secteur aérien ainsi qu'au Canada.

### **5.1 La taxe carbone**

La taxe carbone ne passe pas inaperçue ces derniers temps. Au Canada, son implantation via le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (CPC) par le gouvernement

Trudeau génère des frustrations dans l'Ouest du pays. En Europe aussi, elle fait jaser. Récemment, quelques pays européens dont la France, l'Allemagne, la Suède, le Danemark et l'Italie, ont demandé à la Commission européenne de présenter une initiative à l'échelle de l'Union européenne concernant la tarification de l'aviation civile (Trévidic, 2019, 8 novembre). Mais comment une taxe sur le carbone peut-elle et devrait-elle être appliquée au secteur aérien?

#### **5.1.1 Qu'est-ce qu'est?**

La taxe carbone établit directement un prix sur le carbone à l'aide d'un taux d'imposition qui dépend, bien souvent, de la teneur du produit en énergie fossile. (Banque mondiale, s. d.) Comme mentionné précédemment, il s'agit d'intégrer les coûts de la pollution afin de refléter le prix « réel » du produit (Webster, 2019, septembre). Elle peut être appliquée de façon directe ou indirecte. En établissant un taux d'imposition proportionnel à la teneur en énergie fossile d'un produit, on applique une taxe directe. Toutefois, lorsqu'on traite d'une taxe sur le carburant ou d'une réduction des subventions aux énergies fossiles, il est question d'une taxe indirecte. (Banque mondiale, 2019) L'objectif de la taxe carbone est d'inciter un changement de comportement chez les individus. À la suite de son implantation, ceux-ci devraient se tourner vers des produits à faible teneur en carbone ce qui se traduirait par une diminution des émissions de GES. (Webster, 2019, septembre)

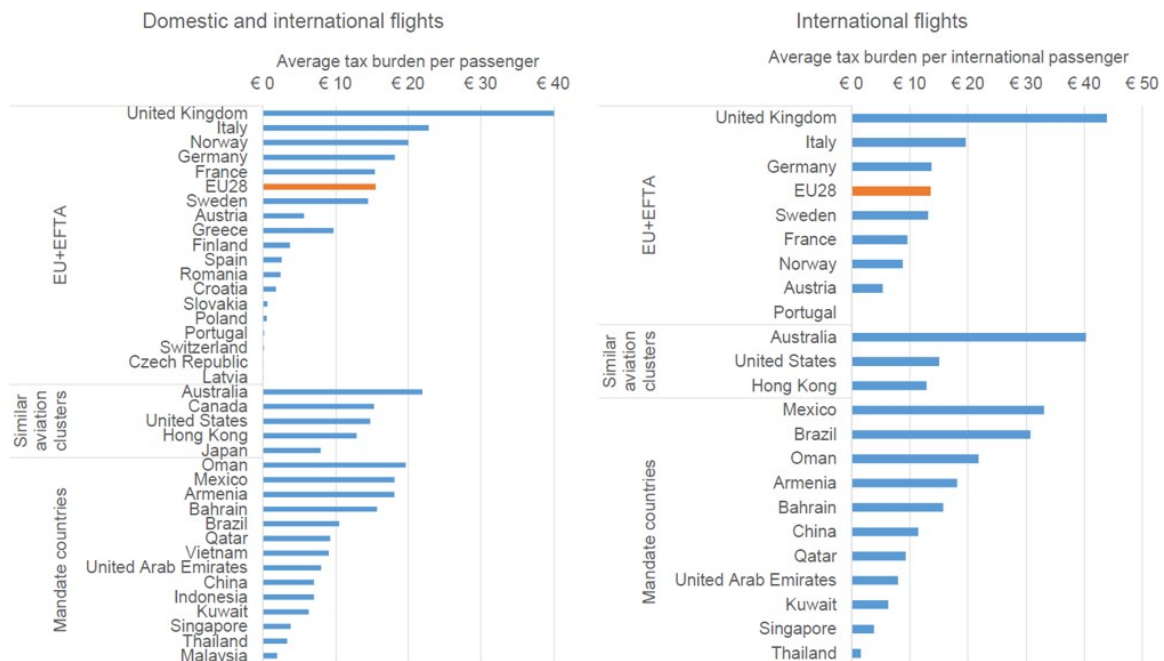
#### **5.1.2 Avantages et inconvénients**

La taxe carbone est une méthode dite « efficiente » puisqu'elle permet à la société de réduire ses émissions de GES pour un moindre coût. Effectivement, tant que le coût de réduction sera inférieur à la tarification elle-même, ce sera « rentable » de minimiser son impact environnemental. (Webster, 2019, septembre) La taxe carbone permettrait également de stimuler la recherche et le développement de technologies vertes favorisant ainsi une croissance économique à faibles émissions de carbone. (Banque mondiale, s. d.) Cette taxe pourrait aussi générer des profits ce qui ouvre le débat quant à l'usage de ce nouveau revenu. Il peut notamment être utilisé pour financer des infrastructures vertes, encourager l'innovation durable ou être retourné aux citoyens sous forme de baisses d'impôt. (Webster, 2019, septembre; Pelouas, 2019, 1er avril) Ce choix est déterminant dans l'acceptabilité sociale de cette mesure, c'est pourquoi il doit être communiqué de manière transparente et claire à la population. (Webster, 2019, septembre) Certes, même si celle-ci est de plus en plus reconnue comme étant un outil économique essentiel dans la lutte contre les changements climatiques, notamment par la Banque mondiale, l'Organisation de coopération et de développement économiques et le Fonds monétaire international, le niveau d'acceptabilité sociale dans la population demeure à la baisse. (Banque mondiale, 2019) Au pays, c'est près d'un Canadien sur deux qui s'oppose à la taxe carbone imposée par le gouvernement Trudeau et qui, dernièrement, semble diviser le pays. (RAD, 2019, 14 octobre) Cette résistance se reflète aussi dans l'industrie aérienne qui d'ailleurs s'y oppose. La demande pour le trafic aérien étant sensible aux variations de prix, le IATA affirme que cela nuirait à la croissance du secteur et

au développement économique. (IATA, s. d.b) L'ajout d'une taxe pourrait représenter un fardeau financier important pour les compagnies aériennes qui déjà, opèrent grâce à des marges de profit faible (Hayden-Lefebvre, 2019, 19 septembre). D'un autre côté, la mise en place d'une taxe carbone dans le secteur aérien peut être perçue comme un « rééquilibrage » face aux autres secteurs, comme le transport routier, qui eux, sont taxés. (Centre for Asia Pacific Aviation, 2019) La taxe carbone peut également désavantager la population à faible revenu qui est plus encline à être affectée. C'est pourquoi les gouvernements doivent être vigilants et planifier des mécanismes de compensation afin d'éviter de creuser les inégalités. (Webster, 2019, septembre)

### 5.1.3 La taxe carbone appliquée au secteur aérien

L'aviation civile internationale possède un régime de taxation considéré plus faible en comparaison à d'autres secteurs. (CE Delft, 2018) Afin d'illustrer ce propos, la figure 5.1 montre de quelle façon les taxes en aviation sont réparties à travers différents pays. Il est possible de remarquer que, de façon globale, le transport international est moins taxé puisque la figure de droite compte moins de pays que celle de gauche. (CE Delft, 2019)



EFTA = European Fair Trade Association

Note : Les pays non mentionnés dans la figure n'appliquent aucune taxe spécifique (indirecte) à l'aviation ou appliquent un taux nul pour certaines taxes ; la valeur d'exemption des taxes n'a pas été quantifiée

**Figure 5.1 : Taxes moyennes liées au transport aérien** (tiré de : CE Delft, 2019)

En Europe, aucun pays membre de l'Union européenne (UE) ne taxe le kérosène que ce soit pour les vols domestiques ou les vols internationaux. Ce sont des taxes sur les billets d'avion ou une taxe sur la valeur ajoutée (TVA) qui sont appliquées. La figure 5.2 présente graphiquement la valeur moyenne des



taxes en aviation par pays sur les vols domestiques et internationaux (gauche) et pour les vols internationaux seulement (droite). On peut constater, une fois encore, que le transport international est, en général, moins taxé que le transport domestique. (CE Delft, 2019)

**Figure 5.2 : Taxes moyennes par passager (domestique et international vs international seulement) (tiré de : CE Delft, 2019)**

L'introduction d'une taxe carbone peut se présenter sous diverses formes dans le secteur de l'aviation : taxe sur le kérosène, taxe sur les billets d'avion, taxe dite « par vol » ou taxe sur la valeur ajoutée (TVA). Ainsi, faut-il choisir le type de taxe appropriée au contexte géographique et politique, mais également fixer un prix et déterminer ce qui adviendra des profits réalisés. Les paragraphes suivants présentent ces différentes formes de taxes.

se trouvant dans un aéronef d'un État contractant à son arrivée sur le territoire d'un autre État contractant et s'y trouvant encore lors de son départ de ce territoire, sont exempts des droits de douane, frais de visite ou autres droits et redevances similaires imposés par l'État ou les autorités locales. »

Il est ainsi possible de constater, qu'en réalité, seul le carburant *déjà à bord* d'un aéronef à son atterrissage est exonéré de taxation. D'autre part, l'absence d'un accord international concernant la taxation du carburant pourrait provoquer une distorsion de marché nommé *tankering* ou remplissage maximal systématique, incitant les aéronefs à faire le plein d'essence dès leur entrée en territoires non taxés. Cela aurait un effet contreproductif, selon une perspective environnementale, puisque les avions pourraient être portés à voler plus loin afin d'éviter la taxation et plus lourds en remplissant les réservoirs plus fréquemment que nécessaire. (Seely, 2019) Une approche unilatérale, c'est-à-dire un pays ou un regroupement de pays décidant par lui-même d'imposer une taxe sur le kérosène, ne serait donc pas à privilégier à cause du risque de *tankering*.

L'OACI prône cette notion d'équité entre les différents pays, qu'elle nomme principe de réciprocité. À cet effet, elle possède une politique concernant la taxation du carburant dans laquelle elle affirme qu'il est pratique courante d'exempter ou de rembourser les taxes sur le carburant ou les huiles lubrifiantes pris à bord d'un aéronef une fois à destination finale. Cette exemption est d'ailleurs habituellement mentionnée de façon explicite dans les ententes bilatérales entre pays. (CE Delft, 2019)

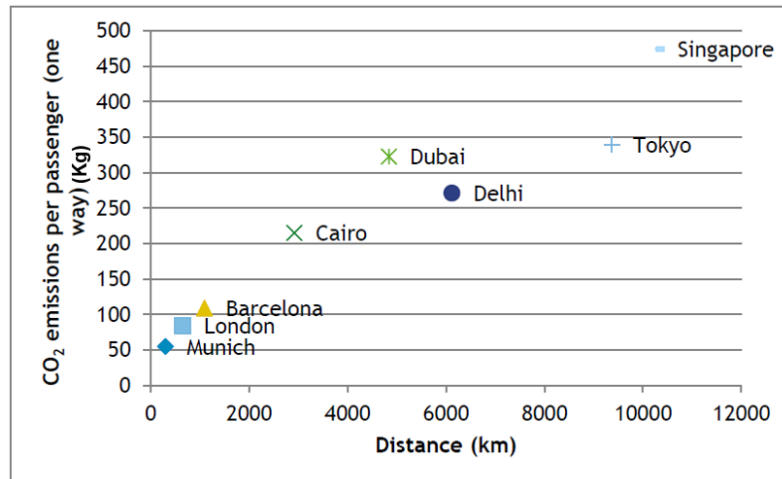
Les vols domestiques, quant à eux, ne sont pas couverts par la Convention de Chicago. Dans plusieurs pays tels que l'Australie, le Japon, les États-Unis et le Canada, le carburant est taxé. En Europe, en revanche, le carburant destiné aux aéronefs, pour fonction commerciale, est exonéré de la taxe d'accise selon la directive sur la taxation de l'énergie de la Commission européenne. Cependant, selon l'Article 14(2) de la directive, un État décidant de déroger à cette exemption devrait taxer le kérosène sous le taux minimal de la taxe d'accise fixé à 0,48 cents le litre. Jusqu'à présent, aucun pays membre de l'Union européenne n'a fait exception à l'exemption de taxation pour le transport aérien domestique. (CE Delft, 2019)

D'un point de vue environnemental, une taxe sur le carburant devrait mener à des réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> ainsi qu'à une diminution des effets non-CO<sub>2</sub>, comme le bruit et les traînées de condensation, discutés au chapitre 1. Or, il n'est pas certain que ceux-ci soient réduits dans la même proportion. En effet, dans le cas où les compagnies aériennes se tourneraient vers les carburants à plus faible intensité carbonique cela réduirait les émissions de CO<sub>2</sub>, mais pas forcément les autres effets induits. (Forsyth, 2018)

#### *Taxation fixe des billets d'avion*

Une taxe sur les billets d'avion s'applique à tous les passagers. La *Air Passenger Duty* au Royaume-Uni en est un exemple. (CE Delft, 2019) Celle-ci variera de 19 \$ CA à 116 \$ CA à partir d'avril 2020 selon de

la distance parcourue pour un siège en classe économique. (Gouvernement of UK, 2019) Toutefois, une taxe comme celle du Royaume-Uni, à tarif fixe, n'internalise pas de façon proportionnelle les dommages causés à l'environnement. (CE Delft, 2018) En effet, la taxe du Royaume-Uni varie selon la destination avec un seuil limite d'environ 3220 km. (Gouvernement of UK, 2019). Ainsi, une personne voyageant au Caire paiera la même taxe que celle allant à Tokyo alors que ces deux destinations, ayant le même point de départ, ne sont pas équivalentes en termes d'émissions de GES comme le rapporte la figure 5.3. Il y a en effet une forte corrélation entre la quantité de CO<sub>2</sub> émise et la distance parcourue.



**Figure 5.3 : Émissions de CO<sub>2</sub> par vol en partance de Frankfurt** (tiré de : CE Delft, 2018)

Augmenter le nombre de catégories de distances pourrait permettre d'internaliser les externalités négatives de manière plus juste, mais cela viendrait par ailleurs complexifier son utilisation. Ainsi, ce n'est pas le type de taxe le mieux adapté si l'on souhaite que le montant payé soit le plus représentatif possible des impacts sur l'environnement.

Le montant de la taxe peut également varier en fonction de l'intensité carbonique du carburant utilisé. Ceux émettant peu de carbone durant leur cycle de vie, comme les SAF, seraient alors privilégiés des compagnies aériennes. Ce n'est donc pas la quantité de carburant ici qui est taxée, mais plutôt la « qualité ». (CE Delft, 2018) Dans cette perspective, un vol qui utiliserait des carburants alternatifs, ou une certaine proportion, serait ainsi moins taxé qu'un vol utilisant du kérosène.

Ultimement, une taxe sur les billets d'avion permet de réduire indirectement les émissions de GES en diminuant la demande. De cette manière, tous les impacts sur l'environnement, même ceux induits par les éléments non-CO<sub>2</sub> (le bruit, les traînées de condensation, etc.), en sont réduits. (Forsyth, 2018)

#### *Taxation dite « par vol »*

Cette forme de taxation est un concept assez récent puisqu'il n'a pas encore été implanté dans le monde. Cette taxe serait basée sur la masse maximale au décollage de l'avion ainsi que sur la distance

parcourue. Cela pourrait donc inciter les compagnies aériennes à remplir les avions au maximum afin d'éviter des coûts supplémentaires. Autre distinction, la taxe « par vol » pourrait aussi s'appliquer aux passagers en transit. Cette mesure pourrait alors favoriser les vols directs réduisant par le fait même les émissions de GES. D'ailleurs, cette taxe semble mieux se corrélérer avec la consommation de carburant et les émissions de GES qu'une taxe sur les billets d'avion. (CE Delft, 2018) Cependant, sa validité est discutable puisqu'elle pourrait potentiellement aller à l'encontre des articles 15 et 24 de la Convention de Chicago qui stipulent respectivement (OACI, 1944):

« Aucun État contractant ne doit imposer de droits, taxes ou autres redevances uniquement pour le droit de transit, d'entrée ou de sortie de son territoire de tout aéronef d'un État contractant, ou de personnes ou biens se trouvant à bord »

« Au cours d'un vol à destination ou en provenance du territoire d'un autre État contractant ou transitant par ce territoire, tout aéronef est temporairement admis en franchise de droits, sous réserve des règlements douaniers de cet État ».

Une analyse légale plus approfondie serait nécessaire afin de conclure s'il est possible légalement d'appliquer cette taxe.

#### *Taxation sur la valeur ajoutée (TVA)*

La taxe sur la valeur ajoutée est une taxe de consommation appliquée à l'achat d'un bien ou d'un service. Celle-ci s'applique uniformément à tous les individus indépendamment de leur salaire. C'est pourquoi elle est souvent perçue comme une taxe régressive qui défavorise la population à faible revenu. (Kagan, 2019) Au Canada, la Taxe sur les produits et services de 5 % est son équivalent (Gouvernement du Canada, 2019). Dans le secteur aérien, le transport domestique est souvent sujet à la TVA. Celle-ci peut s'appliquer à différents tarifs comme au carburant ou aux frais d'aéroports. La plupart des pays européens appliquent la TVA sur leurs vols domestiques, c'est aussi le cas au Canada. En revanche, le transport international bénéficie d'une exemption à cette taxe. En effet, l'OACI, supportée par le IATA, affirme que la pratique générale est d'appliquer un taux de TVA nul au transport aérien international puisque celui-ci a lieu en dehors des limites territoriales de juridiction fiscale. De surcroît, l'industrie croit qu'il est essentiel de conserver, de manière globale, un traitement équitable entre les différents pays. (CE Delft, 2019) De la même manière que pour la taxe sur le carburant, l'industrie préfère qu'aucun État ne soit désavantagé comparativement aux autres.

#### **5.1.4 Applicabilité au Canada**

Le contexte géographique et politique du Canada est bien différent de celui de l'UE. Effectivement, le Canada couvre un immense territoire et ne possède qu'une seule frontière terrestre avec un autre état : les États-Unis. L'aviation joue également un rôle important dans le transport de marchandises et de passagers en plus d'approvisionner des communautés éloignées. (Chalifour et Besco, 2018) Ces critères doivent donc être pris en compte afin de déterminer quel type de taxe serait le plus approprié.

Le tableau 5.1 résume quels types de taxes qui sont appliquées, respectivement, au transport domestique et international aérien. Au Canada, le carburant pour les vols domestiques est déjà taxé. Au niveau fédéral on retrouve la taxe d'accise (10 cents le litre) et la TVA (5 %) qui s'appliquent sur l'essence alors qu'au niveau provincial, les valeurs de TVA varient. À cela, il faut ajouter les taxes provinciales sur l'essence qui varient entre 6 cents et 25 cents le litre. (Ressources naturelles Canada, 2019) Dans le cas des taxes sur les billets d'avion, il importe de faire la distinction entre « taxe » et « redevance ». Selon la définition de l'OACI, les redevances « sont des droits perçus pour financer le coût de la fourniture d'installations et services destinés à l'aviation civile » alors que les taxes « ont pour but de procurer des recettes publiques générales, au niveau national ou local, qui seront utilisées à des fins non aéronautiques » (OACI, 2000).

Selon ces définitions, les montants associés aux frais d'aéroports, de sécurité et de navigation de l'air sont considérés comme des redevances et non des taxes puisqu'ils servent à financer des activités aéronautiques. Dans cette optique, on pourrait affirmer qu'il n'y a pas de taxes sur les billets d'avion, mais plutôt des redevances. Effectivement, la seule taxe qui y est prélevée, à l'échelle nationale, est la TVA comme il a été mentionné précédemment. La taxe dite « par vol », quant à elle, n'existe pas au Canada ni nulle part ailleurs. Essentiellement, le transport aérien domestique au Canada est déjà relativement bien couvert par différentes taxes et redevances tandis que le transport international s'en sort plutôt bien, exempté de taxes. Le carburant utilisé pour le transport international échappe à la taxation, et ce même dans le CPC (Ricardo Energy & Environnement, 2018).

**Tableau 5.1 : Taxes appliquées au transport domestique et international au Canada** (compilation d'après : Ressources naturelles Canada, 2019; Ricardo Energy & Environnement, 2018)

Type de taxe	Transport domestique	Transport international
Taxe sur le carburant	Oui	Non
Taxe sur les billets d'avion*	Non	Non
Taxe « par vol »	Non	Non
Taxe sur la valeur ajoutée	Oui	Non

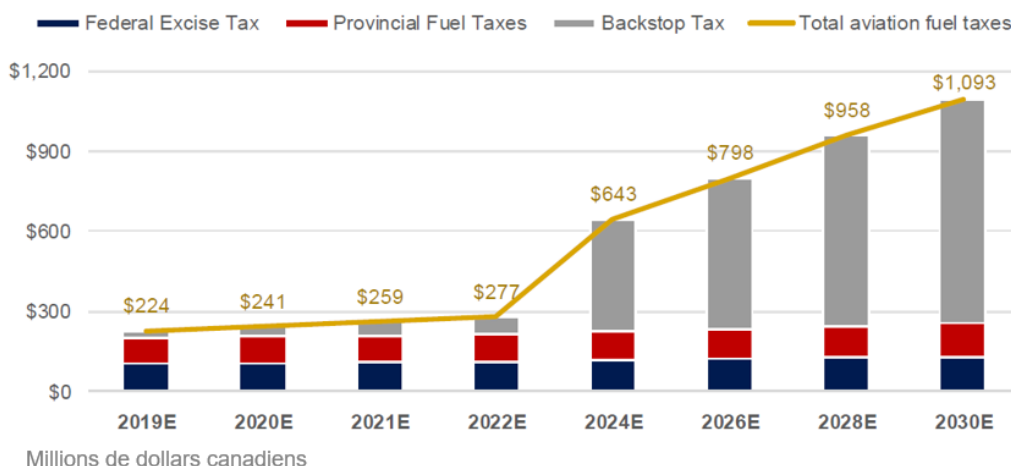
\* Attention à la distinction entre « taxe » et « redevance »

À la lumière de ce qui précède, il est possible d'analyser le contexte canadien sachant que l'implantation de la taxe carbone à l'échelle du pays a déjà commencé et qu'elle devrait augmenter le prix du carburant. La taxe carbone du « standard fédéral » a été fixée à 20 \$ CA la tonne en 2019 et augmentera progressivement jusqu'à atteindre 50 \$ CA en 2022 (Deloitte, 2019). Cette mesure a fait réagir l'industrie aérienne. À cet effet, le Conseil national des lignes aériennes du Canada a demandé à *AirTrav*, une firme de consultation en aviation internationale, de réaliser une série d'études sur les conséquences de la taxe carbone sur le secteur de l'aviation canadienne. La dernière étude a évalué son impact financier sur différentes routes domestiques dans les provinces où le « standard fédéral » s'applique (Ontario, Manitoba, Saskatchewan et Nouveau-Brunswick) en plus d'estimer les revenus générés par cette taxe.

L'étude affirme que la taxe carbone augmenterait de 800 millions de dollars canadiens par année le coût du transport aérien au Canada et que cette augmentation des prix, combinée à la proximité des États-Unis, pourrait encourager les Canadiens à prendre l'avion de l'autre côté de la frontière. Cela pourrait aussi freiner le tourisme et inciter la population à voyager à l'international plutôt qu'au pays. (Conseil national des lignes aériennes du Canada [CNLA], 2019)

Du point de vue du citoyen, l'étude déplore l'inégalité qui serait créée avec les communautés éloignées (CNLA, 2019). Il est vrai que la taxe carbone n'est pas prévue de s'appliquer sur le carburant des aéronefs pour les provinces du Yukon et du Nunavut. Ce faisant, une famille voyageant de Churchill à Ottawa verrait le coût de ses billets d'avion augmenter de 350 \$ CA entre 2019 et 2030 alors qu'une autre famille, voyageant de Yellowknife à Ottawa, serait épargnée de ce fardeau financier (CNLA, 2019). Il faut cependant mettre les choses en perspective et comprendre que ces provinces sont épargnées de ces frais puisqu'elles dépendent fortement du transport aérien (ECCC, 2016).

L'étude *d'AirTrav* souligne aussi l'aubaine que représente la taxe carbone pour le gouvernement fédéral en termes de revenu. Dès 2022, les redevances perçues seraient supérieures à celles associées à la taxe d'accise fédérale et aux taxes provinciales sur le carburant combinées (figure 5.4). (CNLA, 2019)



**Figure 5.4 : Revenus projetés des taxes dans le secteur aérien domestique** (tiré de : CNLA, 2019)

Il est vrai que les montants de ces revenus peuvent paraître impressionnants, mais lorsqu'on considère qu'en 2016 le Canada a versé près de 4,8 milliards de dollars canadiens en subvention au secteur des énergies fossiles cela permet de relativiser (Climate transparency, 2018). En l'occurrence, cela porte plutôt l'intérêt sur la question : de quelle façon ces revenus seront-ils utilisés? Le gouvernement propose de retourner la quasi-totalité (90 %) des recettes aux particuliers, petites et moyennes entreprises, municipalités et organismes publics ou à but non lucratif (Belzile, 2019, 8 juillet). C'est ce qu'on appelle une approche de fiscalité neutre (Webster, 2019, septembre). Ainsi, dans certains cas particuliers, comme les foyers à faibles revenus, le montant retourné pourrait être supérieur à la somme payée initialement.

(Belzile, 2019, 8 juillet) Le Conseil national des lignes aériennes du Canada présente les recettes de la taxe carbone comme un revenu supplémentaire pour le gouvernement alors que dans les faits, si celui-ci tient promesse, ce n'est pas nécessairement le cas.

En somme, le gouvernement du Canada s'est déjà bien occupé du transport aérien domestique qui est sous sa juridiction en taxant le carburant au niveau fédéral et provincial et en appliquant la TVA. La taxe carbone, nouvellement mise en place, de même que la Norme sur les combustibles fossiles, si appliquée au secteur aérien, devraient permettre de générer des revenus et migrer vers des carburants à plus faible intensité carbonique. Une taxe environnementale sur les billets d'avion pourrait aussi être envisagée puisqu'actuellement il n'y en a pas en place, mais cette mesure supplémentaire pourrait être perçue comme déraisonnable dans le présent contexte où déjà, le déploiement de la taxe carbone suscite de fortes oppositions. Par ailleurs, on assiste à un déséquilibre entre le transport domestique et international. Les conclusions et les opinions des acteurs impliqués dépendent ainsi de la perspective avec laquelle ils observent le problème.

## **5.2 Le marché du carbone**

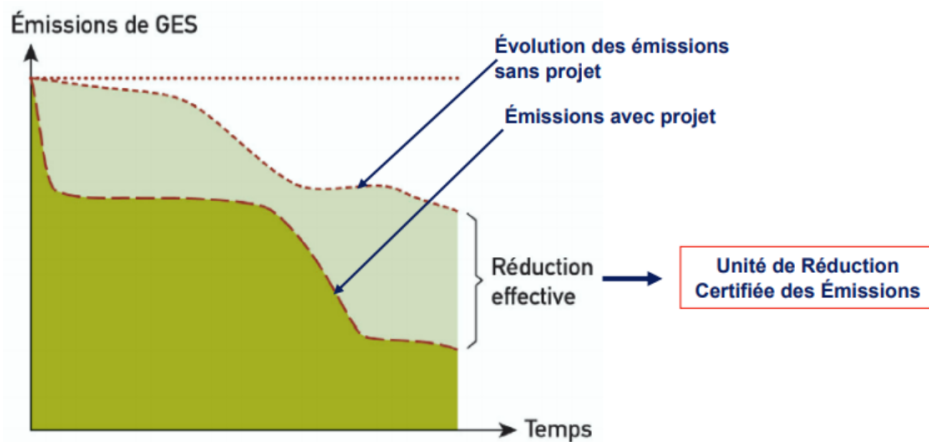
Le marché du carbone permet l'échange de droits d'émissions, ou quotas, au même titre que des titres financiers via un « système d'échange de quotas d'émissions ». Les entreprises doivent acheter des « droits à polluer » basés sur la quantité d'émissions qu'elles veulent émettre puisqu'un droit équivaut à une tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>. Dans certains cas, le nombre de droits d'émission est limité par le gouvernement pour un ou plusieurs secteurs de l'économie. C'est ce qu'on appelle les « systèmes de plafonnement et d'échanges ». (Market business news, 2019) Une fois les quotas distribués par le gouvernement, les entreprises doivent les respecter à moins d'acheter des droits d'émissions supplémentaires. Ces quotas additionnels peuvent être achetés sur le marché du carbone ou peuvent provenir, par exemple, d'autres entreprises possédant des droits d'émissions excédentaires. (Tavernier, 2017)

Afin de garantir l'intégrité du système, la conception d'un marché du carbone doit intégrer quatre concepts clés : un processus d'allocation, un système de mesure et de vérifications des émissions, un registre comptable et l'utilisation de mesures de flexibilité. Tout d'abord, il faut déterminer quelle proportion des émissions de GES seront couvertes, quel sera le plafond pour les émetteurs et ensuite comment distribuer les droits d'émissions au sein des acteurs. Ensuite, il s'avère aussi important de faire un suivi et une vérification des émissions afin que le nombre de quotas soumis corresponde bien aux émissions réelles. Par ailleurs, il est essentiel que le marché fasse preuve de transparence et puisse assurer la traçabilité des transactions à l'aide d'un registre. Finalement, un marché du carbone doit accepter l'utilisation de crédits de compensation générés, à titre de récompenses, par des réductions d'émissions de GES. (Delbosc et De Perthuis, 2009) On retrouve actuellement deux types de marché du carbone : le

marché réglementé et le marché volontaire. Ceux-ci sont détaillés plus amplement dans les sections suivantes.

### 5.2.1 Le marché réglementé

Le marché du carbone réglementé a été créé en réponse au Protocole de Kyoto pour aider les gouvernements à atteindre leurs cibles de réduction (Reyers, s.d.). Afin de minimiser les coûts associés à la réduction d'émissions de GES, le Protocole a défini des mécanismes de flexibilité qui permettent aux acteurs d'acquérir des unités de réduction d'émissions certifiées (CER : *Certified Emissions Reductions*) en finançant des projets d'atténuation à l'étranger. C'est via des mécanismes de projet comme le Mécanisme de développement propre (MDP) ou la Mise en œuvre conjointe (MOC) que cela peut être réalisé. Dans le cas de projets MDP, les pays industrialisés (énoncés dans l'Annexe 1 du protocole) peuvent ainsi atteindre leur objectif de réduction tout en aidant les pays en développement (hors Annexe 1 du protocole). Autrement dit, les entreprises peuvent choisir de délocaliser leurs réductions d'émissions de GES. Cette initiative a été mise en place afin de favoriser les investissements dans les pays en développement et faciliter le transfert de technologies (Delbosc et De Perthuis, 2009). La quantité de CER générée est calculée selon un scénario de base dit « sans projet ». On évalue ainsi les émissions de GES selon un scénario « avec projet » et on le compare au scénario de référence comme illustré à la figure 5.5. La différence entre les deux, ou réduction effective, correspond au nombre d'unités de réduction certifiées. (Energies 2050, s.d.)



**Figure 5.5 : Comptabilisation des unités de réduction des émissions certifiées par MDP** (tiré de : Energie 2050, s. d.)

Il est aussi possible de transférer des unités de réduction d'émissions d'un pays à l'autre. Cela peut se produire lors de la réalisation d'un projet MOC entre un pays investisseur et un pays hôte. La réduction d'émissions du projet financé par le pays investisseur ne générera pas de crédits de carbone, mais servira plutôt à réduire, en quantité équivalente, les obligations de réduction du pays hôte. (Delbosc et De Perthuis, 2009)



Il existe plusieurs marchés réglementés dans le monde. Le plus important est le EU ETS (*European Union Emission Trade System*). Il couvre environ 45 % des émissions européennes et fixe un plafond pour les centrales électriques, l'industrie manufacturière et l'aviation intra-européenne. Depuis les dernières années, l'EU ETS a connu une forte dépréciation des prix en raison de surplus de quotas. (Alberola et al., 2019) Afin d'éviter ce problème, l'Union européenne (UE) a récemment créé la Réserve de Stabilité de Marché qui sert à retirer et stocker des quotas excédentaires en cas d'une diminution des activités économiques. Cela permet d'éviter une chute des prix comme, par exemple, à la suite de la crise économique de 2008. (Institut pour l'Education Financière du Public, 2019) Cependant, on a assisté dernièrement à une augmentation des prix expliquée en partie par l'adoption de la réforme des règles de fonctionnement post-2020 et l'anticipation des effets de la Réserve de Stabilité de Marché. Le surplus de quotas reste néanmoins important et équivaut à près d'un an d'émissions. (Alberola et al., 2019) L'avenir s'annonce donc meilleur pour l'EU ETS bien que certains enjeux doivent être suivis de près, notamment en ce qui concerne le Brexit et les conséquences qu'auront le Programme de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA) sur le marché. Ce dernier point sera discuté plus amplement dans une section subséquente.

Au Canada, il existe le Système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission, en vigueur depuis 2013, dans la province de Québec. Celui-ci est lié au marché de la Californie depuis 2014, selon la *Western Climate Initiative*, un regroupement qui inclut l'état américain de la Californie et les provinces canadiennes du Québec et de la Nouvelle-Écosse (Western Climate Initiative, s. d.). Ce marché réglementé oblige les gros émetteurs œuvrant dans les secteurs ciblés (plus de 25 000 tonnes) à réduire ou compenser leurs émissions de GES. (Tavernier, 2017) Or, depuis 2018, les individus, entreprises ou organismes, non assujettis, peuvent aussi joindre le marché volontairement, sous certaines conditions. (Léveillé, 2019, 18 février)

### **5.2.2 Le marché volontaire**

Le marché du carbone volontaire opère de façon indépendante au marché réglementé. Il permet à n'importe qui, ayant une conscience environnementale, de compenser ses émissions de GES en achetant des crédits de carbone générés par le marché volontaire. À l'instar des CER, ces derniers sont appelés des émissions de réduction volontaires (VER : *Voluntary Emissions Reductions*). (Energies 2050, s.d.)

Le marché volontaire est plus petit que le marché réglementé puisque la demande est moins grande. (Stockholm Environment Institute et Greenhouse Gas Management Institute, s.d.) En début 2018, 430 Mt d'éq. CO<sub>2</sub> de crédits volontaires ont été émis par plus de 2000 projets depuis 2005. Malgré sa petite taille, les activités ont augmenté dans les dernières années. Le prix des crédits volontaires peut varier grandement dépendamment des préférences du marché, mais de façon courante, le prix moyen des VER

est inférieur à celui des CER. Par exemple, pendant le premier quart de 2018, la moitié des crédits volontaires s'est vendue à moins de 1,30 \$ CA la tonne d'éq. CO<sub>2</sub>. (Banque mondiale, 2019)

Afin de maintenir un certain niveau de qualité des crédits compensatoires, ceux-ci doivent être certifiés selon des standards définis. Sur le marché volontaire, les standards *Verified Carbon Standard* (VCS) et *Gold Standard* (GS) sont les plus reconnus. (Energies 2050, s.d.) Ils servent ainsi à certifier des projets afin de s'assurer que les réductions d'émissions soient bien réelles.

Le marché volontaire et le marché réglementé peuvent opérer en parallèle puisqu'ils ne ciblent pas les mêmes acteurs. D'un côté, les marchés réglementés, régis par les gouvernements, visent les gros émetteurs en leur fournissant un incitatif financier pour réduire les émissions de GES. De l'autre côté, les marchés volontaires sont destinés aux individus et aux organisations qui désirent compenser leurs émissions. Les motivations peuvent être diverses allant de la conviction environnementale à la volonté d'améliorer l'image d'une compagnie. (Lafortune, s. d.)

### **5.2.3 Le marché du carbone appliqué au secteur aérien**

Le marché du carbone est appelé à jouer un rôle important pour le secteur aérien dans la lutte contre les changements climatiques, notamment par le déploiement du programme CORSIA. Dès 2021, les compagnies aériennes devront compenser certaines de leurs émissions de GES lorsque celles-ci dépasseront le seuil de référence basé sur 2019-2020 (OACI, 2019d). Il importe de rappeler que, de façon générale, seuls les vols entre deux États participants représentent les routes couvertes par CORSIA tel que présenté à la figure 2.4 du chapitre 2. L'industrie présente le programme comme étant un moyen souple permettant aux compagnies aériennes de compenser leurs émissions tout en investissant et en implantant de nouvelles technologies. (CNLA, 2017)

Cependant, avant même sa mise en pratique, le programme fait face à plusieurs critiques. Certains affirment que le seuil de référence n'est pas très ambitieux. On peut comparer avec l'EU ETS qui fixe le plafond à 95 % de la moyenne des émissions de 2004-2006 et qui intégrera à partir de 2021 une réduction progressive annuelle. (Maertens, Grimme, Scheelhaase, et Jung, 2019, octobre) L'UE vise ainsi diminuer les émissions des vols intra-européens de 43 % d'ici 2030 par rapport à 2005 (Trévidic, 2019, 25 septembre), ce qui est largement plus ambitieux que de stabiliser les émissions au niveau de 2020. De plus, le programme CORSIA ne concerne que le CO<sub>2</sub>. Les autres effets qui contribuent aussi au réchauffement climatique ne sont donc pas couverts. (Maertens et al., 2019, octobre) D'autres remettent en question le principe même de la compensation affirmant qu'au mieux, il en résultera une opération nulle, qui n'implique en rien une réduction des émissions du secteur. Le programme de compensation CORSIA pourrait même donner l'impression de dissocier la source du problème de ses conséquences en

déplaçant la responsabilité du transport aérien aux autres secteurs. Cela éviterait, par le fait même, la décarbonisation de l'aviation civile. (Korber Gonçalves, 2017)

Dans le même ordre d'idées, certains critiquent qu'il n'y aura aucune réduction à la source, mais plutôt une compensation qui s'accompagne d'incertitudes quant aux réductions réelles d'émissions de GES (Larsson, Elofsson, Sterner et Åkerman, 2019, janvier). La qualité ainsi que l'intégrité des crédits de compensation font partie, effectivement, des plus grandes sources d'inquiétude associées à CORSIA et avec raison, puisque ce sont des critères déterminants dans la réussite et la crédibilité du programme dans la lutte contre le réchauffement climatique (Timperley, 2019, 4 février). Cela soulève un questionnement quant à la compensation elle-même : fonctionne-t-elle vraiment? Il est en effet difficile de démontrer l'additionnalité d'un projet, c'est-à-dire que le projet a bien eu lieu grâce à la vente des crédits de compensation. Ce principe est habituellement défini comme étant : « une réduction d'émissions de GES qui n'a pas eu lieu pendant le cours normal des affaires, qui va au-delà de la réglementation en vigueur et des pratiques courantes et qui n'aurait pas eu lieu sans incitatif supplémentaire. » (Environnement et Lutte contre les changements climatiques, s.d.) La permanence des réductions d'émissions ainsi que leur quantification réelle sont aussi des éléments ardues à prouver. (Transport & Environment, 2019)

En effet, quelques études ont démontré qu'une proportion importante des crédits de compensation disponibles sur le marché, autant réglementé que volontaire, ne permettent pas de réduire les émissions de GES. (Öko-Institut e.V., 2016; Reyers, s.d.; Larsson et al., 2019, janvier) Certains déplorent que les projets soient financés pour faire ce qu'ils auraient fait de toute manière tandis que les crédits de compensation générés sont utilisés par les entreprises des pays industrialisés pour compenser leurs émissions excédentaires au seuil. (Reyers, s.d.) Pour tenter de surmonter ces obstacles, l'OACI a publié, en mars 2019, ses critères d'éligibilité concernant les crédits de compensation acceptés dans le cadre du programme CORSIA. Ceux-ci incluent notamment l'additionnalité, la transparence et la permanence. (OACI, 2019b) L'Organisation a aussi mis sur pied un comité nommé *Technical Advisory Body* afin d'évaluer les différents programmes de compensation en fonction des critères d'éligibilité. Le comité sera ainsi en mesure d'affirmer lesquels rencontrent les requis et formulera des recommandations à l'OACI. (Transport & Environment, 2019)

Malgré tout, un autre risque persiste : le « double comptage ». Les choses étaient plus simples sous le Protocole de Kyoto, car seuls quelques pays industrialisés possédaient des cibles de réduction. Le nombre de transactions étant limité, le risque de double comptage était minimisé. Cependant, depuis l'Accord de Paris, tous les États membres ont des cibles de réduction, ce qui implique qu'ils doivent rapporter leurs émissions de GES et donc, indirectement, leurs réductions. Il est donc essentiel de mettre en place des mécanismes robustes afin d'éviter, par exemple, qu'une réduction d'émissions ne soit comptabilisée par une compagnie aérienne dans le cadre de CORSIA ainsi que par un pays hôte dans

l'atteinte de ses cibles de réductions nationales. (Transport & Environment, 2019; Stay Grounded, 2018) Autrement dit, il ne faudrait pas qu'une réduction d'émissions soit revendiquée par deux parties prenantes différentes puisque cela mènerait à un double comptage. Jusqu'à présent, il plane une incertitude quant à la méthodologie qui sera employée afin d'éviter une telle situation. (Transport & Environment, 2019) Il pourrait être également plus avantageux pour les pays de vendre des crédits de compensation aux compagnies aériennes que d'atteindre leurs propres cibles. (Larsson et al., 2019, 2019, janvier) C'est pourquoi les états pourraient être incités à se fixer des objectifs plus faibles. (Transport & Environment, 2019)

L'entrée de l'aviation civile internationale sur le marché du carbone provoquera une augmentation marquée de la demande pour les crédits de carbone. À l'heure actuelle, il semble encore incertain si les crédits acceptés pourront provenir du marché volontaire, réglementé ou des deux. Selon les prévisions de l'OACI, pendant la période couverte par CORSIA (2021-2035), 3 Gt CO<sub>2</sub> devraient être compensées ce qui amènerait le secteur aérien à devenir la plus grande source de demande pour les crédits de compensation internationaux. (Banque mondiale, 2019) Cette quantité est quatre fois plus élevée que les émissions de GES du Canada pour l'année 2017. Il est donc légitime de se demander de quelle façon cette demande supplémentaire affectera le marché existant. L'offre actuelle est-elle suffisante pour y répondre?

L'Öko-Institut, en coopération avec l'Institut de l'Environnement de Stockholm et le *NewClimate Institute*, s'est penché sur la question. Ils ont estimé le potentiel d'approvisionnement des quatre plus importants programmes de compensation : le Mécanisme de développement propre (MDP), le *Verified Carbon Standard* (VCS), le *Gold Standard* (GS) et le *Climate Action Reserve* (CAR). La Mise en œuvre conjointe (MOC) n'a pas été considérée, car il était incertain si des crédits de compensation seraient délivrés dans la seconde période du Protocole de Kyoto (2013-2020). L'estimation de cette réserve de crédits porte sur la période de 2013 à 2035 et se base seulement sur les projets existants publiquement listés. Différents facteurs, tels que l'ancienneté, la vulnérabilité et l'origine des projets et le double comptage des pays hôtes, ont permis d'élaborer 13 scénarios qui sont représentés à la figure 5.6. (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019) Ces facteurs sont décrits plus en profondeur dans les paragraphes suivants afin de permettre la bonne compréhension des différents scénarios.

#### *L'ancienneté*

La notion d'ancienneté des crédits de carbone a été rapidement abordée dans le contexte du déploiement de CORSIA. En effet, il existe des réserves importantes de crédits non utilisés, associés à des projets existants, qui pourraient, potentiellement, servir d'approvisionnement aux compagnies aériennes. Afin d'élaborer ses scénarios (tableau 5.2), l'étude a établi différentes contraintes de temps : le moment où la réduction elle-même des émissions a eu effet, la date d'enregistrement des projets, la prise de décision d'investir et la date de début du projet. (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

**Tableau 5.2 : Scénarios basés sur l'ancienneté** (traduction libre de : Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

Type de scénario	Nom du scénario	Brève description du scénario
Référence	<i>2013 Emission reduction vintage</i>	Les réductions d'émissions doivent avoir eu lieu à partir du 1 <sup>er</sup> janvier 2013
Ancienneté #1	<i>2017 Emission reduction vintage</i>	Les réductions d'émissions doivent avoir eu lieu à partir du 1 <sup>er</sup> janvier 2017
Ancienneté #2	<i>2013 Registration vintage</i>	L'enregistrement du projet doit avoir eu lieu le 1 <sup>er</sup> janvier 2013 ou après
Ancienneté #3	<i>2017 Registration vintage</i>	L'enregistrement du projet doit avoir eu lieu le 1 <sup>er</sup> janvier 2017 ou après
Ancienneté #4	<i>2013 Investment decision vintage</i>	La décision d'investir dans le projet doit avoir eu lieu le 1 <sup>er</sup> janvier 2013 ou après
Ancienneté #5	<i>2017 Investment decision vintage</i>	La décision d'investir dans le projet doit avoir eu lieu le 1 <sup>er</sup> janvier 2017 ou après
Ancienneté #6	<i>2013 Start of operations vintage</i>	La date de début du projet doit avoir eu lieu le 1 <sup>er</sup> janvier 2013 ou après
Ancienneté #7	<i>2017 Start of operations vintage</i>	La date de début du projet doit avoir eu lieu le 1 <sup>er</sup> janvier 2013 ou après

#### *La vulnérabilité*

Pour l'Agence environnementale allemande, le principe d'additionnalité est intimement lié à la vulnérabilité d'un projet qui, elle, est évaluée selon le type de projet et le pays dans lequel le projet a lieu. Ainsi, dans le contexte de l'étude, un projet dit vulnérable est par le fait même considéré comme additionnel. Cette définition diffère légèrement de celle énoncée auparavant, car elle ne tient pas compte du cadre réglementaire et de la pratique courante. Dans cette optique, l'étude affirme qu'en limitant les crédits acceptés aux projets vulnérables, le programme CORSIA pourrait permettre des réductions d'émissions qui n'auraient pas eu lieu, le cas échéant. Afin de catégoriser les projets, l'étude s'est basée sur des analyses réalisées précédemment par le MDP. Ces catégories ont ensuite servi à élaborer deux scénarios différents tels que présentés au tableau 5.3. (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

**Tableau 5.3 : Scénarios basés sur la vulnérabilité** (traduction libre de : Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

Type de scénario	Nom du scénario	Brève description du scénario
Vulnérabilité #1	<i>High or variable vulnerability projects</i>	Projets à vulnérabilité élevée ou variable
Vulnérabilité #2	<i>High vulnerability projects</i>	Projets à vulnérabilité élevée seulement

#### *L'origine des projets*

Le programme CORSIA pourrait promouvoir les réductions d'émissions de GES dans des pays spécifiques tels que les pays en voie de développement (LDC : *Least Developed Countries*) ou les petits états insulaires en développement (SIDS : *Small Islands Developing States*). Les crédits de compensation

éligibles pourraient provenir de projets ayant lieu dans ces états. Cela a mené à l'élaboration d'un scénario représentant cette situation (tableau 5.4). (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

**Tableau 5.4 : Scénario basé sur l'origine des projets** (traduction libre de : Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

Type de scénario	Nom du scénario	Brève description du scénario
Pays hôte	LDCs & SIDS	Projets ayant lieu dans les pays en développement et petits états insulaires

*L'effet « double comptage »*

Un risque de double comptage apparaît lorsqu'un crédit de compensation est acheté par une compagnie aérienne et que celui-ci tombe également à l'intérieur des limites des contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN) définies par le pays. (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019) Par exemple, une compagnie aérienne pourrait acheter des crédits de compensation liés à la plantation d'arbres au Canada. Le gouvernement canadien ne devrait alors pas considérer ces réductions d'émissions dans le secteur de l'Affectation des terres, des changements d'affectation des terres et de la foresterie dans son inventaire national. Ainsi, cela nécessiterait un ajustement de la part des pays afin de refléter une comptabilisation juste.

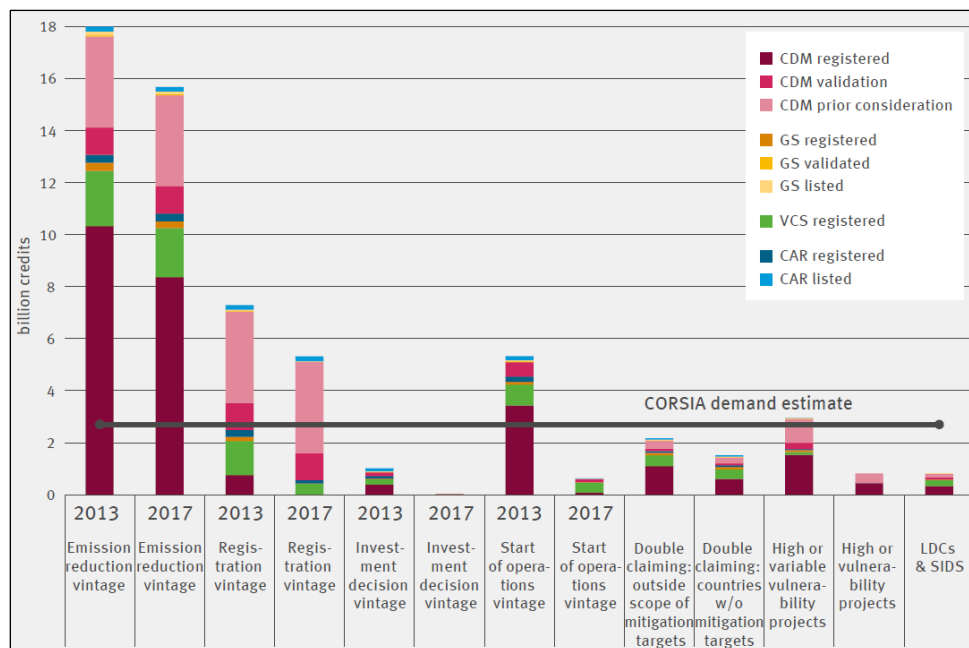
Il existe donc un risque que les pays ne soient pas prêts ou ne veuillent pas appliquer ces ajustements, ce qui pourrait influencer le nombre de crédits de carbone disponibles pour CORSIA. Pour les réductions ayant lieu à l'extérieur de la portée des CPDN, il n'y aurait aucun ajustement nécessaire des pays. Dans les deux scénarios présentés au tableau 5.5, aucun pays n'est enclin à effectuer les ajustements nécessaires, ce qui représente la pire situation de base. (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

Le premier scénario du tableau 5.5 permet aux programmes d'émettre des crédits de compensation, éligibles pour CORSIA, seulement lorsque ces réductions sont à l'extérieur de la portée des cibles internationales d'atténuation. Dans le second scénario, les programmes ne peuvent émettre des crédits de la part de pays qui ne possèdent pas de cibles internationales d'atténuation. (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

**Tableau 5.5 : Scénarios basés sur l'effet du double comptage** (traduction libre de : Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

Type de scénario	Nom du scénario	Brève description du scénario
Double comptage #1	<i>Double claiming: outside scope of mitigation targets</i>	Crédits de compensation seulement pour les réductions hors portée des cibles d'atténuation
Double comptage #2	<i>Double claiming: countries w/o mitigation targets</i>	Crédits de compensation seulement pour les projets situés dans les pays sans cibles d'atténuation

Les résultats des différents scénarios sont représentés à la figure 5.6. Ils sont également mis en perspective avec la demande cumulative estimée pour le programme CORSIA de 2021 à 2035.



**Figure 5.6 : Approvisionnement potentiel en crédits de carbone selon différents scénarios** (tiré de : Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

Il est possible de remarquer que les réserves potentielles de crédits de compensation varient de façon importante. Selon le premier scénario, c'est-à-dire l'offre potentielle depuis 2013, près de 18 Gt de crédits pourraient être disponibles. Cela représente six fois la quantité cumulative prévue pour CORSIA. En revanche, dès que l'on impose certaines contraintes, la réserve potentielle diminue considérablement. Dans certains scénarios, la demande estimée pour CORSIA ne pourrait pas être atteinte. Dans une majorité de scénarios, une proportion importante des crédits de carbone provient du marché réglementé. Il est donc peu envisageable que le marché volontaire à lui seul soit suffisant pour répondre à la demande de CORSIA. Il faut aussi noter que chaque scénario n'implique qu'une contrainte. En superposant plus d'un critère à la fois, il est possible de croire que la réserve potentielle pourrait être encore plus limitée. L'étude en vient également à la conclusion qu'en l'absence de critères d'éligibilité, le programme CORSIA ne mènerait à aucune réduction significative d'émissions de GES. Cela s'explique par le fait que plus 80 % des 18 Gt de crédits de compensation potentiels ont un indice de vulnérabilité faible. C'est donc dire que ces projets sont susceptibles de continuer leurs activités de réduction indépendamment de la vente des crédits de carbone. (Agence environnementale de l'Allemagne, 2019)

Par ailleurs, l'implantation du programme CORSIA à l'échelle internationale a soulevé quelques questionnements concernant sa compatibilité avec le marché EU ETS pour le secteur de l'aviation. Le tableau 5.6 fait état des différences entre l'EU ETS et CORSIA dans leur application à l'aviation civile. À

titre d'exemple, un vol Paris-Rome serait en pratique sujet aux deux systèmes, ce qui pose un problème et mène à se demander ce qui est le plus souhaitable. Les compagnies aériennes insistent sur le fait qu'il est déraisonnable qu'elles soient assujetties aux deux programmes. (Larsson et al., 2019, janvier)

**Tableau 5.6 : Différences entre l'application du système EU ETS et du programme CORSIA au secteur aérien** (traduction libre de : Maertens et al., 2019, octobre)

Système	EU ETS	CORSIA	
Différences fondamentales	Méthodologie	Système d'échange et de plafonnement	Référence et compensation
	Intégrité environnementale	Non applicable Le système est plafonné	Dépend des standards de qualité des crédits de compensation
	Vérification par les autorités	Niveau des émetteurs seulement	Niveau des émetteurs et des projets de compensation
Différences dans l'implantation actuelle et applications	Plafond / référence	95 % de la moyenne des émissions 2004-2006 / Réductions supplémentaires progressives	Moyenne des émissions 2019-2020 / Aucune réduction supplémentaire envisagée
	Portée	Vols domestiques intra-européens	Vols internationaux entre états participants
	Transporteurs affectés	Toute compagnies aériennes opérant sur les routes couvertes, à moins d'indications contraires	
	Aéronefs affectés	Masse maximale au décollage supérieure à 5,7 tonnes	

Une des principales différences entre CORSIA et l'EU ETS réside dans le fait que les émissions de ce dernier sont plafonnées à 95 % de la moyenne des émissions de 2004-2006 jusqu'en 2020. Par la suite, ce plafond sera réduit annuellement de 2,2 % afin d'attendre les objectifs 2030 de l'Union européenne. Les réductions d'émissions de GES de l'EU ETS sont ainsi perçues comme étant plus fiables que celles qui seraient obtenues par compensation sous CORSIA en raison des risques discutés précédemment. (Maertens et al., 2019, octobre) Il est aussi possible de se demander s'il est préférable d'appliquer CORSIA aux vols intra-européens considérant que des contraintes plus sévères sont déjà en place sous l'EU ETS. (Larsson et al., 2019, janvier) L'Union européenne voudrait conserver l'EU ETS pour les vols intra-européens. Le parlement européen a déjà statué que CORSIA n'était pas suffisamment ambitieux en comparaison au système actuel. (Maertens et al., 2019, octobre)

En revanche, la portée de CORSIA est plus large. On estime que dans la phase volontaire, 36 % des émissions du transport aérien seraient couverts par CORSIA et qu'ensuite, cette proportion augmenterait à 52 % en 2027. Dans le cas de l'EU ETS, cela devrait rester stable autour de 8 % des émissions de CO<sub>2</sub>. On s'attend à ce qu'au début, en 2021, CORSIA ne mène qu'à une réduction des émissions globales du secteur aérien de 1,4 % contrairement à 2,1 % pour l'EU ETS. Toutefois, l'impact de CORSIA devrait croître rapidement pour atteindre 12 % en 2030. (Maertens et al., 2019, octobre) Cela peut probablement



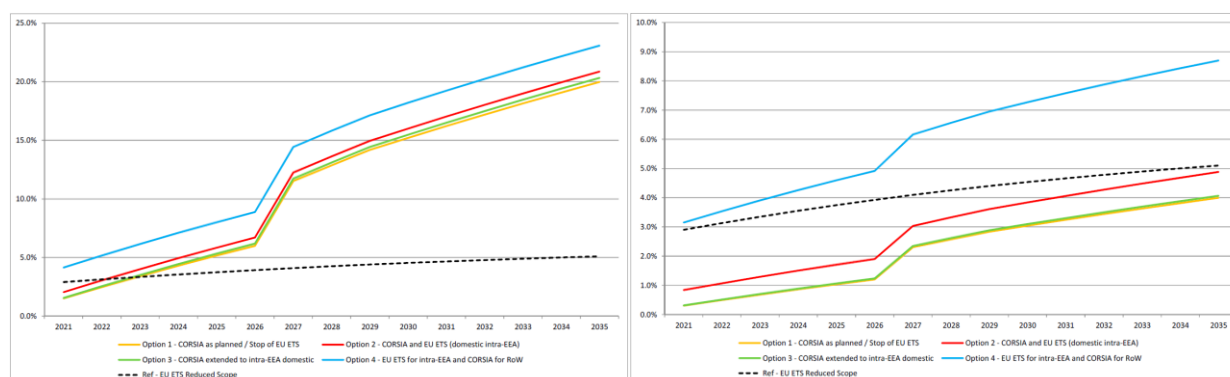
s'expliquer par le fait que la croissance du secteur aérien est surtout attendue en Asie et en Indonésie, tel que vu au chapitre 1. (Chiambaretto, 2019, 8 mai)

Il existe ainsi plusieurs scénarios possibles quant à la compatibilité des deux systèmes pour le secteur aérien. Maertens et al. (2019, octobre) en ont analysé quatre, tels que définis dans le tableau 5.7.

**Tableau 5.7 : Scénario de compatibilité entre CORSIA et EU ETS pour le secteur aérien** (compilation d'après : Maertens et al., 2019, octobre)

Scénarios	Description	Couleur
<b>Option 1</b>	Implantation de CORSIA et discontinuation du EU ETS (« CORSIA seulement »)	Jaune
<b>Option 2</b>	Implantation de CORSIA et EU ETS pour vols domestiques seulement	Rouge
<b>Option 3</b>	Implantation de CORSIA et discontinuation du EU ETS, avec extension volontaire de CORSIA pour les vols domestiques européens	Vert
<b>Option 4</b>	Implantation de CORSIA pour les vols extra-européens et EU ETS pour les vols intra-européens	Bleu

Ils ont ensuite estimé la part d'émissions de CO<sub>2</sub> qui serait couverte pour chaque option. À chaque scénario correspond une couleur comme mentionné au tableau 5.7. Les résultats se retrouvent à la figure 5.7. Le scénario de base, utilisé à titre de référence, correspond à la ligne pointillée. Celui-ci représente la proportion des émissions couverte par l'EU ETS, seulement, en considérant la réduction progressive annuelle prévue à compter de 2021. Les résultats de gauche s'appuient sur les compensations potentielles, c'est-à-dire supposant une efficacité parfaite des crédits de compensation. Toutefois, comme il a été discuté précédemment, seule une faible partie d'entre eux est soupçonnée d'être à l'origine de réelles réductions. Pour ainsi représenter une situation plus réaliste, Maertens et al. (2019, octobre) ont assigné une efficacité de 20 % aux crédits de compensation. Ce sont ces résultats qui sont présentés à la figure de droite.



**Figure 5.7 : Proportions des émissions de CO<sub>2</sub> réduites selon différentes options (efficacité CER à 100 % vs à 20 %)** (tiré de : Maertens et al., 2019, octobre)

Dans les deux situations, la solution optimale semble être l'option 4, c'est-à-dire de conserver l'EU ETS pour les vols intra-européens, mais d'appliquer CORSIA pour les vols extra-européens. Quoi qu'il en soit, on remarque que la qualité des crédits de compensation a un impact significatif sur la quantité d'émissions réduites. Effectivement, avec une efficacité de 20 %, seule l'option 4 permettrait de sauver plus d'émissions de CO<sub>2</sub> que le scénario de référence qui n'implique aucunement CORSIA. (Maertens et al., 2019, octobre) Il importe de noter que l'incompatibilité entre l'EU ETS et le programme CORSIA ne s'applique qu'aux activités aériennes. Le déploiement de CORSIA n'a aucun impact sur l'application du EU ETS aux autres secteurs.

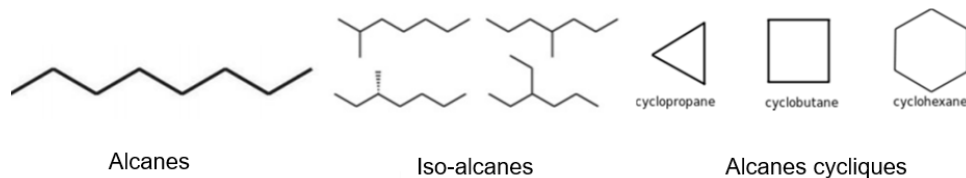
Pour conclure, le programme CORSIA fait face à plusieurs critiques telles qu'un manque d'ambition, surtout en comparaison avec l'EU ETS. D'une part, plusieurs doutes planent quant à la qualité et l'intégrité des crédits de compensation qui pourraient être utilisés dans le cadre de CORSIA. Les études réalisées par l'Agence environnementale de l'Allemagne (2019) et Maerteans et al. (2019) démontrent que les critères d'éligibilité choisis auront une influence capitale sur la réserve potentielle des crédits et sur les quantités d'émissions réduites réelles. Ces critères sont ainsi déterminants dans la réussite et la crédibilité du programme en matière de lutte contre les changements climatiques. D'autres parts, le déploiement de CORSIA à l'échelle internationale amène un problème de compatibilité avec le système EU ETS. Il existe différents scénarios possibles qui pourraient permettre la coexistence des deux systèmes. Toutefois, aucune décision n'a encore été prise, mais celle-ci aura définitivement une incidence sur la proportion des émissions globales de CO<sub>2</sub> qui seront couvertes.

#### **5.2.4 Applicabilité au Canada**

Le Canada a déjà accepté de faire partie de la phase volontaire du programme CORSIA, ce qui devrait permettre au pays de réduire les émissions de GES liées au transport aérien international. Le marché du carbone pourrait également s'appliquer au transport domestique. Effectivement, le Canada pourrait, de façon volontaire, tenter d'implanter CORSIA au niveau du transport national. Cependant, sous la constitution actuelle, les provinces ne sont pas nécessairement liées au gouvernement fédéral lorsque celui-ci signe un accord international. Cette obligation pourrait toutefois être intégrée dans la *Loi sur l'aéronautique* qui réglemente l'aviation civile. Le Canada pourrait aussi faire preuve d'initiative et s'attaquer aux émissions non couvertes par CORSIA à l'aide d'ententes bilatérales. (Chalifour et Besco, 2018)

## 6. LES CARBURANTS ALTERNATIFS DANS LE DOMAINE DE L'AVIATION CIVILE : UNE SOLUTION DURABLE?

De nos jours, la plupart des carburants liquides sont dérivés des énergies fossiles dont surtout le pétrole. C'est d'ailleurs le cas du kérosène qui est utilisé dans l'industrie de l'aviation. Le kérosène est un mélange d'hydrocarbures obtenu par le raffinage du pétrole brut. Dans le milieu aérien, il est habituellement connu sous le nom de carburant *Jet A* ou *Jet A-1*. Dans la majorité des cas, le kérosène est constitué d'alcanes (figure 6.1), des hydrocarbures saturés composés d'atomes de carbone et d'hydrogène liés ensemble par des liaisons simples. (Jeuland et Penanhoat, 2015)



**Figure 6.1 : Exemples d'hydrocarbures saturés (alcanes) entrant dans la fabrication du kérosène**  
(tiré de : Jeuland et Penanhoat, 2015)

Pour voler, les avions utilisent de grandes quantités de kérosène. En 2017, l'aviation commerciale aurait consommé près de 341 milliards de litres de carburant, soit près de 275 Mt (ATAG, 2018a). En extrapolant ces résultats, l'OACI estime que d'ici 2050, la demande pour le secteur pourrait augmenter d'un facteur de 2,4 à 3,8 par rapport à 2015. (OACI, 2019d) Il en va donc de même pour les émissions de CO<sub>2</sub>. Afin de contrer cette croissance, le secteur aérien se tourne vers des types de carburants dits plus verts comme les carburants alternatifs durables qui incluent les biocarburants. Mais en quoi les SAF sont-ils plus durables que les carburants conventionnels? En considérant le cycle de vie complet de ces carburants, ceux-ci permettraient de réduire jusqu'à 80 % les émissions de GES en plus de réduire la dépendance aux énergies fossiles (ATAG, 2017). C'est pourquoi ils sont perçus par l'industrie comme une partie intégrante de la solution vers la décarbonisation du transport aérien. Toutefois, de nombreux obstacles se dressent face à leur commercialisation. Les ressources en matières premières sont-elles disponibles en quantités suffisantes pour répondre à la demande du secteur aérien? Quel procédé de fabrication et quelle ressource devraient être privilégiés? Comment les SAF pourront-ils concurrencer les carburants conventionnels sur le plan financier? Ce sont les interrogations auxquelles le présent chapitre tentera de répondre. Dans un premier temps, il sera question de mettre en contexte ces carburants alternatifs. Comment sont-ils faits? Quels sont leurs avantages et comment peuvent-ils être utilisés dans le secteur de l'aviation? Dans un deuxième temps, quatre technologies de fabrication de SAF seront présentées afin de peser le pour et le contre de chacune. Pour terminer le chapitre, une analyse de comparative sera réalisée pour tenter de départager ces méthodes de fabrication.

## **6.1 L'évolution des biocarburants**

Les biocarburants sont des carburants issus de la biomasse, de la matière organique d'origine animale ou végétale. Ils sont ainsi considérés comme provenant de ressources renouvelables contrairement aux combustibles fossiles. (Actu-Environnement, s. d.) De nos jours, on distingue trois catégories de biocarburants : première, deuxième et troisième génération. La première génération a atteint le stade de commercialisation industrielle alors que la deuxième et la troisième sont encore en voie de développement. Ces trois catégories seront présentées dans les paragraphes suivants.

### **6.1.1 Les biocarburants de première génération**

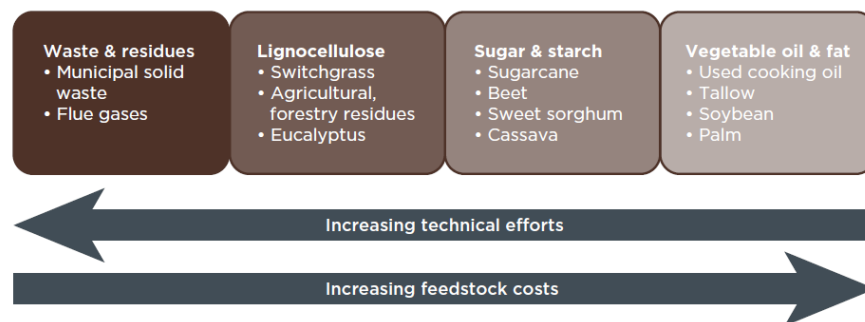
Les biocarburants dont l'éthanol et le biodiesel ont d'abord fait leur apparition dans le secteur routier. L'éthanol est un alcool obtenu par la fermentation des sucres présents, notamment, dans les grains de maïs comme c'est le cas aux États-Unis. (United-States Energy Information Administration, 2019) D'autres sources de sucres peuvent également être utilisées. Par exemple, au Brésil, le deuxième plus grand producteur d'éthanol, la matière première est le sucre de canne (Nunez, 2019, juillet). En France, c'est la betterave à sucre et les céréales comme le blé et le maïs qui sont utilisées pour produire l'éthanol (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019). Le biodiesel, quant à lui, est produit à partir d'huiles végétales (colza, soja, tournesol, palme) ou de graisses animales. C'est grâce au processus de transestérification, une réaction chimique entre l'huile ou la graisse animale, un alcool (généralement le méthanol) et un catalyseur, que le biodiesel est obtenu. La réaction chimique forme deux produits : le glycérol et le biodiesel. (Arthur Lee et Lavoie, 2013; Ressources naturelles Canada, 2018)

Cette première génération de carburant a cependant soulevé plusieurs controverses quant à leur acceptabilité sociale et à leur véritable durabilité. D'une part, le fait qu'ils soient produits à partir de matières premières dédiées avant tout à l'alimentation a fait surgir un enjeu éthique : est-il raisonnable que le secteur des transports soit en concurrence au secteur alimentaire? La demande croissante pour ces matières met ainsi en péril la sécurité alimentaire. D'autre part, cette demande additionnelle peut entraîner un changement d'affectation des terres. Autrement dit, pour s'ajuster à la nouvelle demande, certains terrains comme des forêts ou des zones humides peuvent être transformés en terres agricoles provoquant une augmentation de la déforestation. Cette conversion des terres peut ainsi être à l'origine d'émissions de CO<sub>2</sub> initialement stocké dans le sol et la biomasse. C'est pourquoi, en considérant ces émissions indirectes dans le bilan environnemental, la durabilité des biocarburants de première génération est remise en question. (Poulain, 2014) À l'origine, l'affirmation selon laquelle les biocarburants sont carboneutres repose sur l'hypothèse que la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée par leur combustion est compensée par leur absorption qui a eu lieu pendant leur croissance. Cette supposition est basée sur des analyses de cycle de vie (ACV) qui n'incluent que les émissions de GES provenant de la chaîne d'approvisionnement et non pas le changement d'affectation des terres. (DeCicco et al., 2016)

En somme, bien que les biocarburants de première génération représentent une solution économique viable pour le moment, le prix des ressources est à la hausse, menaçant leur accessibilité. Les enjeux éthiques ainsi que leurs bénéfices environnementaux discutables font également en sorte que les intérêts se sont tournés vers les biocarburants de deuxième et troisième génération. (Arthur Lee et Lavoie, 2013)

### 6.1.2 Les biocarburants de deuxième génération

Afin de pallier les enjeux éthiques et environnementaux soulevés par les biocarburants de première génération, de nouvelles avenues ont été explorées pour produire des biocarburants dits de deuxième génération. La recherche s'est orientée vers la valorisation de la biomasse non destinée à la consommation alimentaire comme les résidus agricoles (le bois et la paille), les déchets municipaux ou les cultures dédiées comme le jatropha, le miscanthus géant et le panic érigé. (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019; Martel et Lalonde, 2018) Ainsi, pour être considérée comme un biocarburant de deuxième génération, la matière première ne doit pas être appropriée à l'alimentation. De plus, les terres sur lesquelles sont cultivées ces ressources doivent être considérées comme des terres marginales, autrement dit, non adaptées à l'agriculture. Le prix de ces matières premières étant inférieur aux ressources destinées à l'alimentation, cela confère aux biocarburants de deuxième génération un incitatif financier important. En revanche, ces matières sont plus difficiles à transformer comme le rapporte la figure 6.2. Elles nécessitent donc des technologies de pointe plus dispendieuses. Atteindre la rentabilité économique représente ainsi un certain défi. (Arthur Lee et Lavoie, 2013; Alam, Mobin et Chowdhury, 2015)



**Figure 6.2 : Coût de la matière première vs complexité technique** (tiré de : El Takriti et al., 2017)

### 6.1.3 Les biocarburants de troisième génération

La troisième génération de biocarburants utilise les lipides contenus dans les algues comme matière première. L'intérêt envers ces microalgues provient de leur grande capacité à capter et convertir l'énergie solaire, ce qui leur confère une grande productivité en comparaison aux plus grandes plantes. Leur teneur en lipides est également élevée pouvant atteindre jusqu'à 80 % de leur poids à sec. (Alam et al., 2015) Toutefois, plusieurs défis accompagnent leur transformation en biocarburant à commencer par leur culture qui demande de grandes quantités d'eau ainsi que des températures assez élevées variant entre

20 °C et 30 °C. L'eau doit ensuite être retirée par filtration ou centrifugation avant d'en extraire les lipides. Il faut également considérer les contraintes géographiques qui limitent leur accès. Les procédés de transformation sont par ailleurs coûteux. (Arthur Lee et Lavoie, 2013)

#### **6.1.4 Les carburants alternatifs durables (SAF)**

Les différentes catégories de carburants présentées jusqu'à maintenant étaient surtout destinées au transport routier, mais qu'advient-il lorsqu'on souhaite transposer cette utilisation au secteur aérien? La sécurité étant une priorité dans le monde de l'aviation, celui-ci possède des standards très élevés. Les carburants utilisés en aviation possèdent des propriétés différentes des carburants routiers tels que l'essence et le diesel (El Takriti et al., 2017). En effet, les conditions atmosphériques au sol diffèrent largement de celles rencontrées à altitude de croisière. Les SAF destinés aux aéronefs doivent ainsi respecter les mêmes propriétés que le kérosène afin de pouvoir y être mélangés. Ils doivent ainsi résister à des variations de températures et de pressions extrêmes et être compatibles avec les matériaux avec lesquels ils seront en contact comme les pièces moteur (Brimont, 2017). C'est via la certification, par l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM), qu'ils devront démontrer qu'ils possèdent ces mêmes caractéristiques avant d'être utilisés de manière commerciale. (ATAG, 2017)

La notion de *drop in* est primordiale pour les SAF comme il a été mentionné précédemment. Cette caractéristique permet à l'industrie d'introduire le carburant sans aucun impact opérationnel. C'est-à-dire que les aéroports, les aéronefs et les moteurs n'ont à subir aucune modification ou certification additionnelle. Pour être en mesure d'utiliser un carburant à titre de *drop in*, il est nécessaire que celui-ci soit fonctionnellement équivalent tout en livrant une performance égale sinon meilleure au kérosène. Pour ce faire, ils doivent donc être similaires en termes de composition chimique et propriétés physico-chimiques. (Jeuland et Penanhoat, 2015; IRENA, 2017)

Plusieurs matières premières peuvent être utilisées pour produire des carburants alternatifs destinés aux aéronefs. Cependant, en raison des enjeux éthiques énoncés précédemment, l'industrie de l'aviation refuse d'utiliser les biocarburants de première génération. Elle reste toutefois ouverte aux biocarburants de deuxième et troisième génération ainsi qu'aux nouvelles technologies qui permettent de créer des carburants à partir de matières non biologiques. (ATAG, 2017) Quelques-unes d'entre elles seront présentées dans les sections suivantes. Jusqu'à maintenant, cinq procédés de fabrication ont été certifiés par l'ASTM (tableau 6.1) (ATAG, 2017). Ils utilisent des matières premières différentes et peuvent être mélangés au kérosène dans des proportions variables. De plus, en avril 2018, l'ASTM a approuvé l'éthanol comme matière première pour le procédé ATJ-SPK. Le procédé, développé par le *Pacific Northwest National Laboratory* et *LanzaTech*, a permis de produire du kérosène synthétique pouvant être mélangé à 50 % avec le kérosène traditionnel. (Pacific Northwest National Laboratory, 2018) Le détail de

ces procédés ne sera pas couvert par l'essai puisque cela en dépasse les limites. Ces informations peuvent également être trouvées ailleurs dans la littérature.

**Tableau 6.1 : Procédés de fabrication de SAF certifiés par l'ASTM** (traduction libre de : ATAG, 2017)

Procédé de fabrication	Matière première possible	Année de certification	Proportion limite
Fischer-Tropsch : kérosène paraffinique synthétique hydrotraité (FT-SPK)	Biomasse (résidus de forêt, herbes, déchets solides municipaux)	2009	Jusqu'à 50 %
Kérosène paraffinique synthétique produit par hydrotraitement d'esters et d'acides gras (HEFA-SPK)	Ex : algues, jatropha, camelina, carinata	2011	Jusqu'à 50 %
Iso-paraffines synthétiques produites par hydrotraitement à partir de sucres fermentés (HFS-SIP)	Conversion microbienne de sucres en hydrocarbures	2014	Jusqu'à 10 %
FT-SPK avec aromatiques (FT-SPK/A)	Biomasse renouvelable (déchets solides municipaux, résidus d'agriculture et de forêt, bois et cultures dédiées)	2015	Jusqu'à 50 %
Kérosène paraffinique synthétique produit par la voie <i>Alcohol-to-jet</i> (Transformation d'alcool en kérosène) (ATJ-SPK)	Résidus d'agriculture (coupe forestière, paille)	2016	Jusqu'à 30 %

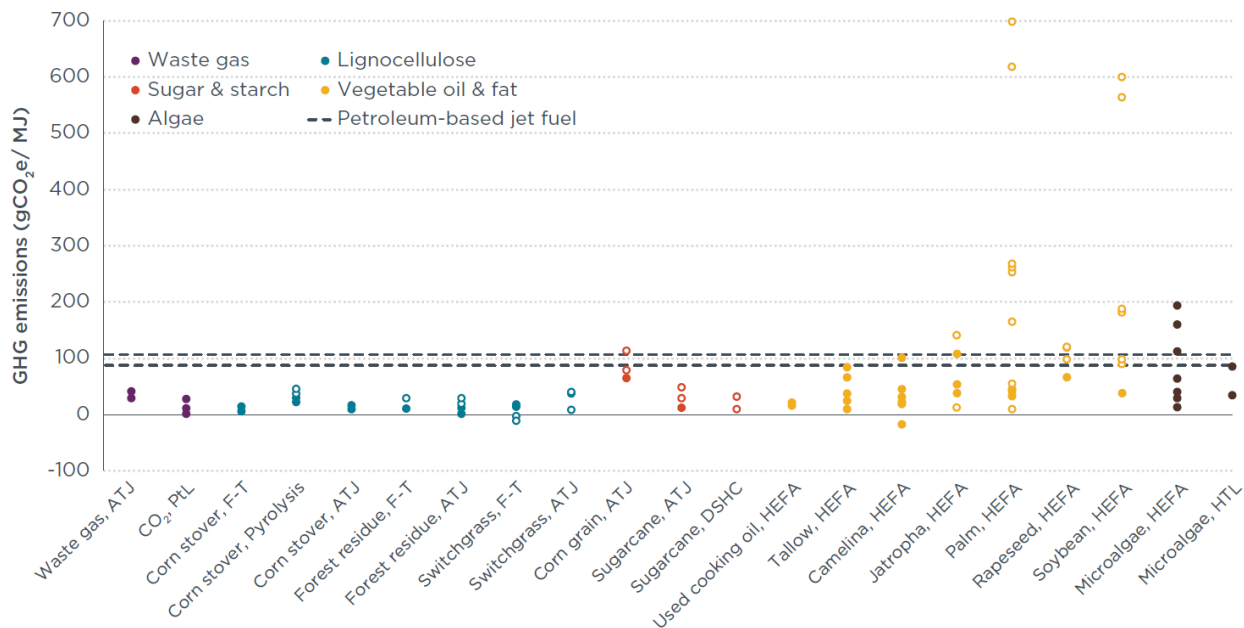
La majorité du biocarburant commercialisé de nos jours pour les avions est produit à partir de matières oléo chimiques telles que les huiles végétales, les graisses animales et les huiles usagées. Il est connu sous le nom de biocarburant HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*). C'est en effet le seul procédé assez mature et économiquement viable à l'heure actuelle. Sa viabilité est néanmoins remise en question lorsqu'on envisage d'augmenter la production en raison du coût des ressources et des quantités disponibles. De plus, le même procédé permet de produire du diesel de type HEFA, communément appelé le « diesel vert » ou « diesel renouvelable », destiné au secteur routier pour lequel le marché est plus développé et les profits plus intéressants (Pavlenko et Kharina, 2018; IRENA, 2017). Ce faisant, les producteurs ont tendance à privilégier la production de diesel HEFA au détriment du biocarburant pour l'aviation. Cependant, en 2016, la capacité opérationnelle mondiale des installations HEFA ne s'élevait qu'à 4,3 milliards de litres par année. Ainsi, même si les infrastructures étaient dédiées exclusivement à la production de carburant pour l'aviation, cela aurait représenté moins de 1,5 % de la demande à ce moment-là. (IRENA, 2017)

## 6.2 Les défis de la décarbonisation

Comme il est possible de le constater, plusieurs défis freinent le développement des carburants alternatifs durables rendant ainsi la décarbonisation du secteur difficile. Dans un premier temps, leur principal désavantage face aux carburants conventionnels est leur prix élevé. Cette situation est d'autant plus

problématique dans le secteur aérien où les coûts attribués au carburant représentent de 30 % à 40 % des dépenses totales des compagnies aériennes. De surcroît, celles-ci opèrent grâce à de faibles marges de profit ce qui les rend particulièrement sensibles au prix du carburant. (IRENA, 2017) Dans un deuxième temps, l'absence de taxes sur le carburant conventionnel contribue dans le même sens à creuser l'écart financier entre les SAF et les combustibles fossiles. (El Takriti et al., 2017) La mise en place de politiques adaptées est donc cruciale pour refermer cet écart et réussir à créer un marché (Chiaramonti, 2019, février). Finalement, la concurrence avec le secteur routier représente un obstacle supplémentaire puisque les chaînes d'approvisionnement sont plus développées et la demande plus élevée. (IRENA, 2017)

Dans une autre perspective, il ne faut pas croire que tous les biocarburants se valent. Leur performance, en termes de réduction d'émissions de GES, peut se mesurer via l'intensité carbonique abordée au chapitre 3. Celle-ci est évaluée grâce à une ACV complète qui doit tenir compte des conséquences de changement d'affectation des terres. La figure 6.3 présente l'intensité carbonique de différents biocarburants selon leur matière première et le type de procédé utilisé. (El Takriti et al., 2017) Les cercles vides tiennent compte du changement d'affectation des terres dans leur analyse contrairement aux cercles pleins.



**Figure 6.3 : Intensité carbonique des biocarburants groupés par procédé de fabrication et type de matière première** (tiré de : El Takriti et al., 2017)

De façon générale, on remarque que les biocarburants possédant une intensité carbonique plus faible sont fabriqués à partir de matières lignocellulosiques, les huiles et les gaz usés et les sucres. Les matières premières comme l'huile de palme et le soja peuvent induire des émissions indirectes importantes par le changement d'affectation des terres. (El Takriti et al., 2017) Il est ainsi possible de



constater que certains biocarburants peuvent émettre davantage d'émissions de GES que les combustibles à base de pétrole. Pour arriver à décarboniser le secteur, il faut donc analyser attentivement tous les éléments du cycle de vie.

Les compagnies aériennes pourront également réduire leurs obligations de compensation en utilisant certains carburants alternatifs éligibles sous CORSIA puisque ceux-ci permettent, en théorie, de réduire l'intensité carbonique des émissions. Cependant, comme il vient d'être discuté, tous les types de biocarburants ne possèdent pas une intensité carbonique plus faible que les carburants conventionnels. C'est pourquoi il est important que des critères clairs et efficaces soient mis en place pour s'assurer que seuls les SAF menant à des réductions d'émissions réelles puissent être crédités dans le cadre de CORSIA. (Transport & Environment, 2019) Jusqu'à maintenant, l'OACI considère éligibles les carburants alternatifs qui répondent aux critères suivants (OACI, 2019b):

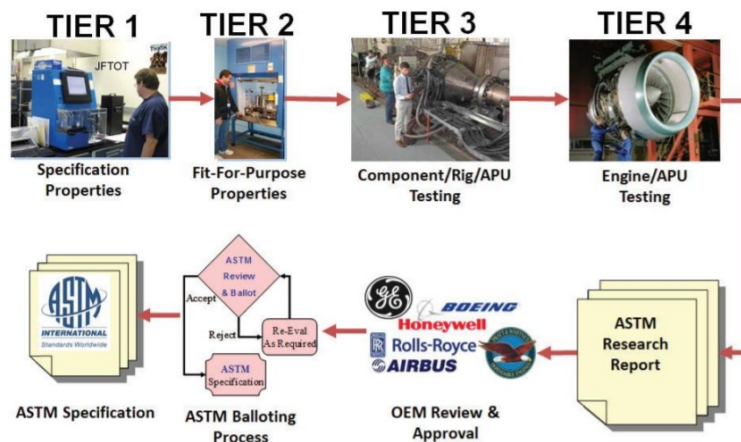
- SAF qui doit permettre une réduction d'au moins 10 % des émissions de GES, comparativement au kérosène, basé sur une analyse de cycle de vie
- SAF qui n'est pas produit à partir de biomasse obtenue à partir d'une terre à haute teneur en carbone convertie après le 1<sup>er</sup> janvier 2008

Ces règles sont cependant critiquées comme étant trop faibles et comportant plusieurs lacunes. Le seuil de 10 % semble peu élevé considérant les incertitudes associées aux calculs des ACV. De cette manière, il est possible qu'un carburant alternatif soit accepté alors qu'il pourrait émettre, en réalité, autant ou sinon plus de GES que le kérosène. De plus, l'éligibilité repose principalement sur la réduction d'émissions de GES. Il n'existe aucun critère associé à d'autres indicateurs de durabilité tels que la consommation d'eau, la biodiversité ou la sécurité alimentaire. (Transport & Environment, 2019) En comparaison, l'Union européenne possède un ensemble de critères applicables aux SAF, via la Directive relative aux énergies renouvelables, qui est plus complet et contraignant. (Commission européenne, 2019) L'OACI a également accepté les carburants à faible teneur en carbone. C'est donc dire qu'un type de kérosène présentant une intensité carbonique plus faible, mais toujours issu des énergies fossiles, pourrait être crédité dans le cadre du programme CORSIA, ce qui pourrait représenter un obstacle supplémentaire à la décarbonisation du secteur. (Transport & Environment, 2019)

### **6.3 La route vers la commercialisation**

La commercialisation d'un nouveau type de carburant alternatif est un processus long et rempli de défis techniques et financiers. Comme il a été présenté, quelques procédés de fabrication sont certifiés, mais un seul ne sert d'approvisionnement à l'échelle commerciale. D'abord, le processus de certification peut prendre plusieurs années et demander des investissements de millions de dollars. (IRENA, 2017) Il est décomposé en quatre étapes principales telles que présentées à la figure 6.4. Les carburants alternatifs doivent en premier lieu respecter les standards de la norme ASTM D1655 (*Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*) qui définit les propriétés spécifiques du carburant conventionnel *Jet A*. Cette

norme ayant été élaborée à la base pour des carburants dérivés du pétrole, certains requis supplémentaires doivent être respectés par les carburants alternatifs. Ceux-ci sont couverts par la norme ASTM D7566 (*Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*). (ASTM, 2013) Des tests seront ensuite réalisés et puis un rapport, écrit par l'ASTM, sera revu par les autorités, comme la *Federal aviation administration*, et les fabricants de moteurs et d'avions.

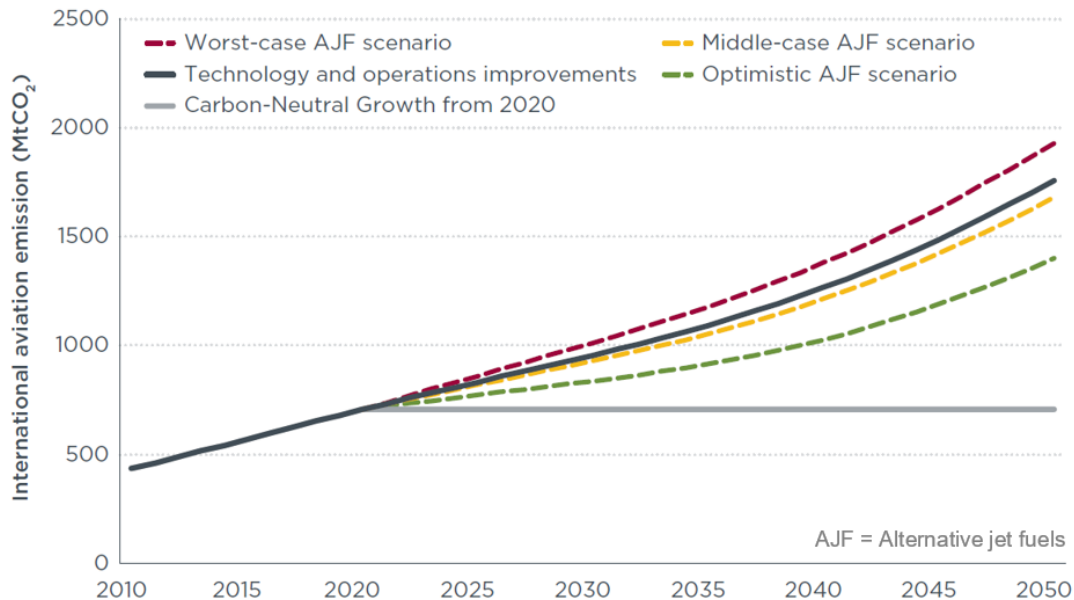


**Figure 6.4 : Aperçu du processus de certification ASTM** (tiré de : Redaelli, 2016)

Cependant, il ne suffit pas d'obtenir la certification ASTM pour être en mesure de commercialiser un nouveau carburant alternatif. Il faut en effet qu'il puisse y avoir une adéquation entre la demande et la disponibilité des ressources. La demande en carburant pour les aéronefs est estimée entre 24 et 37 exajoules (EJ) en 2050. Les prévisions réalisées en 2014 par Searle et Malin (2014) supposent que la quantité d'énergie maximale disponible provenant de la biomasse pourrait varier de 60 à 120 EJ par année pour tous secteurs confondus. Celles-ci évaluent l'énergie découlant principalement des résidus de cultures, de la sylviculture et des déchets. Cependant, ce scénario ne serait plausible qu'en convertissant toutes les terres non utilisées, ce qui entraînerait une déforestation de masse ainsi qu'une perte de biodiversité importante. Dans un scénario plus réaliste où l'on considère la compétition avec les autres secteurs, Searle et Malin réduisent leurs estimations entre 10 et 20 EJ par année. Il est néanmoins possible de croire que la majeure partie de cette biomasse serait utilisée pour le secteur des transports où les profits sont plus avantageux. (El Takriti et al., 2017)

Il est ainsi possible de reprendre le graphique de l'OACI montrant les prévisions des émissions de GES de l'aviation tout en y incorporant différents scénarios de réductions attribuables à l'utilisation des SAF produits à partir de matières lignocellulosiques (figure 6.5). Le scénario le plus optimiste (ligne verte) se base sur l'hypothèse que 25 % des biocarburants disponibles soient dédiés au secteur aérien, cela ne fournirait que 4 EJ par année et représenterait une diminution annuelle de 357 Mt d'éq. CO<sub>2</sub>. Cela représente le bénéfice maximal pouvant être atteint grâce aux SAF en 2050. Dans un scénario plus réaliste (ligne jaune) où les ressources ne sont pas exploitées à leur maximum et dans lequel une part raisonnable est attribuée au transport routier, les biocarburants pourraient générer 1,1 EJ par année pour

le secteur aérien entraînant ainsi des réductions annuelles de 80 Mt d'éq. CO<sub>2</sub> en 2050. Dans le pire scénario (ligne rouge), si on utilisait comme matière première des ressources destinées à l'alimentation qui ont une moins bonne performance environnementale que les combustibles fossiles, cela pourrait mener à une augmentation annuelle des émissions de GES de 170 Mt d'éq. CO<sub>2</sub> en 2050. (El Takriti et al., 2017)



Note: Estimates of AJF emissions include technology and operations improvements.

**Figure 6.5 : Contribution potentielle des carburants alternatifs aux réductions d'émissions de GES du secteur de l'aviation internationale** (tiré de : El Takriti et al., 2017)

En confrontant ces estimations aux prévisions de l'OACI, dans lesquelles le scénario le plus optimiste suggère que la croissance neutre à partir de 2020 ne serait atteinte que si la totalité du kérosène était remplacée par des biocarburants, il est possible de conclure que ce scénario est hautement improbable.

En plus de répondre à la demande, il faut être en mesure d'offrir le produit à un coût compétitif. Actuellement, les carburants alternatifs ne peuvent rivaliser financièrement avec les carburants conventionnels. Le prix des SAF produits à partir de matières lignocellulosiques varie entre 1307 \$ CA et 10 454 \$ CA la tonne alors que celui des SAF fabriqués à partir de sucres s'étend entre 1045 \$ CA et 6272 \$ CA la tonne. Pour les carburants produits à partir d'huiles végétales, le prix varie entre 1307 \$ CA et 2613 \$ CA la tonne. Les carburants conventionnels, eux, sont vendus entre 614 \$ CA et 1124 \$ CA la tonne. (El Takriti et al., 2017)

La viabilité des carburants issus de la biomasse est mise à rude épreuve face à la future demande du secteur aérien pour plusieurs raisons dont le manque de ressources disponibles. C'est pourquoi beaucoup d'efforts sont déployés dans la recherche pour développer de nouveaux procédés de

fabrication, utiliser des matières premières alternatives et réduire les coûts de production. À cet égard, de nouvelles technologies de fabrication sont présentées aux sections suivantes.

#### **6.4 Technologies de fabrication de carburants alternatifs à l'étude**

La route vers la commercialisation est semée d'embûches et requiert un support gouvernemental important. Comme il a été possible de le constater, des investissements majeurs sont nécessaires et l'État peut aider au développement par le biais de subventions. À cet effet, le gouvernement du Canada a lancé en 2017 le défi « Visez haut! » qui a pour objectif de supporter la commercialisation au pays d'un carburant plus propre pour les aéronefs via l'attribution d'une subvention (Groupement aéronautique de recherche et développement en environnement, 2018). Jusqu'à présent, les quatre finalistes du concours sont connus. Ce sont d'ailleurs sur ces technologies de fabrication que l'analyse comparative se concentrera.

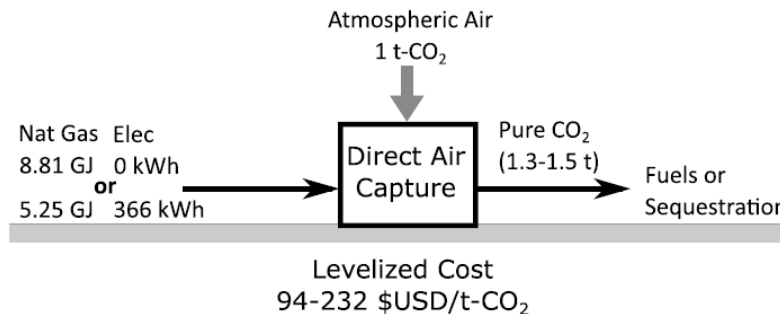
##### **6.4.1 Capture et séquestration du carbone**

La concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> ne cesse d'augmenter et cela est fortement corrélé au développement des activités anthropiques provoquant ainsi le réchauffement climatique (GIEC, 2018). Dans cette perspective, une idée est née : capter le CO<sub>2</sub> présent dans l'air pour le stocker ou voire même l'utiliser. Cette idée a mené au développement de nouvelles technologies et à la création d'un marché qui, selon l'Institut Pembina, pourraient représenter près de 800 milliards de dollars à travers le monde. Ce sont plus de 180 projets qui sont répartis mondialement, dont une dizaine se trouve au Canada. (Plourde, 2019, 15 avril) Pour la compagnie *Climeworks*, une entreprise suisse œuvrant dans la capture du carbone, c'est une manière, pour l'industrie aérienne, de boucler le cycle du carbone en réutilisant encore et encore le CO<sub>2</sub>. (Holligan, 2019, 1er octobre) Deux finalistes du concours « Visez haut! » se sont démarqués en proposant d'utiliser cette technologie afin de produire des carburants plus verts : Carbon Engineering et Consortium SAF+.

##### *Carbon Engineering*

La compagnie, située en Colombie-Britannique, désire « purifier l'air » en captant le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère pour le transformer ensuite en combustible synthétique destiné au transport routier et aérien. L'entreprise souhaite que ses usines soient répandues au même titre que des usines de traitement des eaux ou des centrales électriques. (Plourde, 2019, 15 avril) Pour ce faire, la technologie nommée « Capture directe de l'air » est utilisée. L'air est d'abord aspiré dans une tour de refroidissement dans laquelle de fines surfaces de plastique sont recouvertes d'une solution d'hydroxyde de potassium. Cette solution non toxique permet de retirer le CO<sub>2</sub> de l'air en l'emprisonnant sous forme de sels de carbonate. Le CO<sub>2</sub> contenu dans la solution est ensuite soumis à des réactions chimiques dans le but d'augmenter sa concentration, de le purifier et de le comprimer afin qu'il puisse être de nouveau réutilisable sous forme gazeuse. (Carbon Engineering, 2019) Un stockage sous terre est ensuite envisagé (Plourde, 2019). Le procédé, tel

qu'illustré à la figure 6.6, permettrait de produire, pour le moment, environ 1 Mt de CO<sub>2</sub> par année en utilisation continue. (W. Keith, Holmes, St. Angelo et Heidel, 2018)

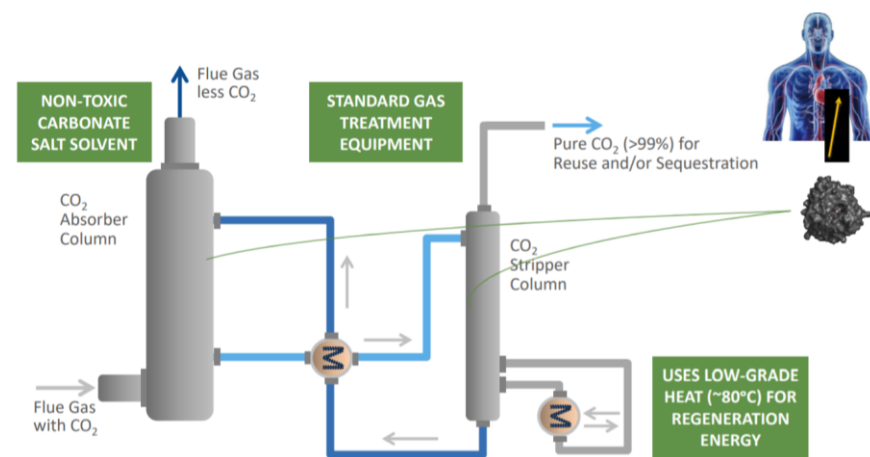


**Figure 6.6 : Procédé « Capture directe de l'air » de Carbon Engineering** (tiré de : W. Keith et al., 2018)

L'entreprise possède une usine pilote à Squamish depuis 2015 et affirme avoir été en mesure de capter le carbone dans l'air pour près de 131 \$ CA la tonne. Carbon Engineering croit pouvoir atteindre la viabilité financière en arrivant à réduire le coût à moins de 131 \$ CA. Cela lui permettrait de concurrencer les producteurs de biocarburants. (Plourde, 2019, 15 avril) Il existe toutefois de grandes incertitudes financières liées à l'augmentation de la capacité du processus de fabrication et à la construction d'une autre usine. D'autres facteurs, tels que la performance du système ainsi que le coût des ressources entrantes, influencent aussi le prix à la tonne. (W. Keith et al., 2018)

#### *Consortium SAF+*

Le consortium québécois est un regroupement d'acteurs impliqués à travers toute la chaîne de valeur de l'aviation. L'équipe est ainsi composée de Groupe Conseil Carbone, CO<sub>2</sub> Solutions Inc., Air Transat, le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services et les aéroports de Montréal. (SAF+ Consortium, s. d.) La technologie utilisée pour capturer le carbone dans l'atmosphère est fournie par CO<sub>2</sub> Solutions Inc (figure 6.7). L'objectif est de capter le carbone à même les cheminées des entreprises polluantes grâce à l'installation d'une tour d'absorption. (Duval, 2019, 29 mai) À l'instar de Carbon Engineering, la compagnie emploie l'enzyme anhydrase carbonique qui agit en tant que catalyseur pour absorber le CO<sub>2</sub> en accélérant son hydratation (Fradette, Lefebvre et Carley, 2017, juillet). Par la suite, le liquide riche en carbone est acheminé vers une seconde tour où il est chauffé afin d'en extraire le CO<sub>2</sub> à l'état pur. Une fois le CO<sub>2</sub> extrait, un procédé chimique pourra le transformer en gaz de synthèse et puis finalement en carburant. (Duval, 2019, 29 mai)



**Figure 6.7 : Procédé de CO2 Solutions Inc.** (tiré de : Surprenant, 2017)

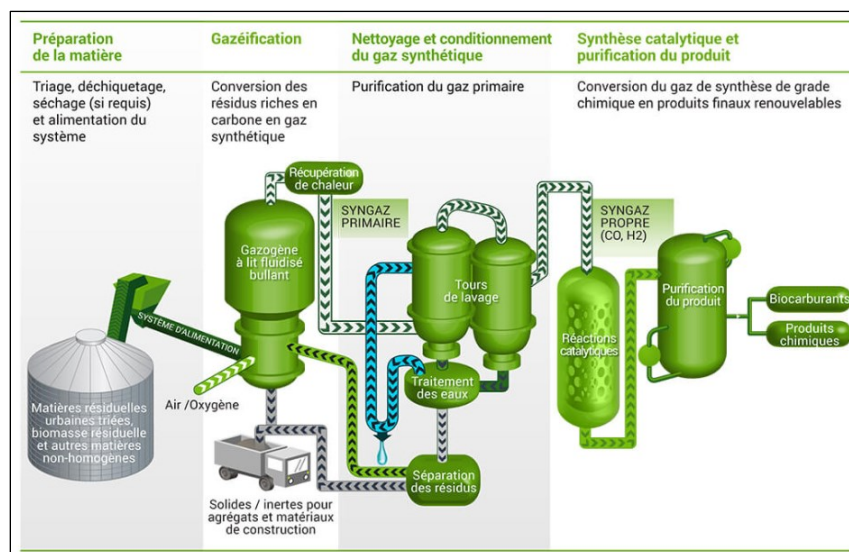
Un projet pilote mené à Salaberry-de-Valleyfield lors de l'été et l'automne 2015 a permis de capter 10 tonnes de CO<sub>2</sub> par jour. (Fradette et al., 2017, juillet) En 2018, leur premier projet de commercialisation, en partenariat avec l'entreprise Produits forestiers Résolu et les Serres Toundra, a permis de passer à 30 tonnes de CO<sub>2</sub> par jour (CO2 Solutions, s.d.). Le budget pour le projet a cependant été dépassé de 3 millions de dollars sur les 8 millions prévus. (Décarie, 2019, 19 septembre) En revanche, une fois les infrastructures en place, l'opérabilité des installations nécessite peu de main-d'œuvre puisque la tâche principale des opérateurs se résume à prendre des échantillons pour les analyses laboratoires. (Fradette et al., 2017, juillet)

#### 6.4.2 Déchets et biomasses

Il est également possible de produire de l'éthanol à partir de déchets municipaux solides tel que vu dans la section sur les biocarburants de deuxième génération. En plus de diminuer notre dépendance aux énergies fossiles, cette alternative permettrait de valoriser nos matières résiduelles non recyclables plutôt que de les enfouir (Biello, 2011). C'est ce que propose la compagnie québécoise Enerkem.

##### *Enerkem*

L'entreprise fabrique des biocarburants ainsi que des produits chimiques renouvelables à partir de déchets municipaux non recyclables grâce à un procédé thermochimique présenté à la figure 6.8. (Enerkem, s. d.a) Tout d'abord, les matières résiduelles sont triées et déchiquetées pour ensuite être amenées dans le système de gazéification qui transforme la matière de la phase solide à la phase gazeuse. Le système étant fermé, le manque d'oxygène empêche la matière de brûler. Il se forme ainsi un gaz de synthèse, aussi appelé syngaz, riche en monoxyde de carbone et en hydrogène. Par la suite, le syngaz est nettoyé afin d'en retirer les impuretés. Finalement, le gaz est converti en liquide par synthèse catalytique qui réorganise l'arrangement des molécules pour former de l'éthanol et du méthanol. (Enerkem, s. d.c)



**Figure 6.8 : Procédé de gazéification d'Enerkem** (tiré de : Enerkem, s. d.a)

En 2014, Enerkem a inauguré à Edmonton la première usine commerciale au monde produisant de l'éthanol et du méthanol à partir de matières résiduelles non recyclables. Celle-ci permet donc de détourner annuellement près de 100 000 tonnes métriques de déchets de l'enfouissement. Sa capacité de production annuelle s'élève à 38 millions de litres. (Enerkem, s. d.b) La ville d'Edmonton affirme que, dans sa situation, il lui en coûte 127 \$ CA pour convertir une tonne de déchets en biocarburant alors que l'enfouissement lui en coûte 111 \$ CA. Elle affirme toutefois qu'en choisissant de promouvoir la valorisation des déchets, elle contribue aussi à réduire ses émissions de GES. (Stolte, 2018, 19 février) Le faible prix de la matière première représente sans aucun doute un avantage. La concurrence principale, dans ce cas-ci, ne provient pas des autres producteurs de biocarburants, mais bien des compagnies détenant des sites d'enfouissement. (Biello, 2011) La volonté des gouvernements de bannir l'enfouissement, comme dans la province de Québec, pourrait aussi favoriser cette transformation des déchets en biocarburants. (Nadeau, 2019, 19 octobre)

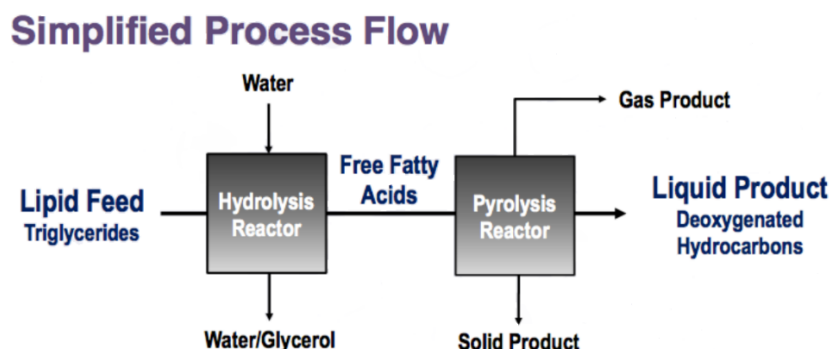
### 6.4.3 Lipides et graisses

Les biocarburants, tels que le diesel vert, peuvent être produits à partir d'huiles comme évoqué précédemment. Cette méthode de fabrication nécessite habituellement de l'hydrogène et un catalyseur minéral afin de retirer l'oxygène présent (Metella, 2017). L'entreprise FORGE Hydrocarbons propose un procédé différent qui éviterait d'avoir recours à ces éléments dispendieux.

#### *FORGE Hydrocarbons*

L'entreprise albertaine possède la licence principale d'une nouvelle technologie de l'Université d'Alberta nommée *Lipid-to-Hydrocarbon* (LTH). (Metella, 2017) Cette méthode utilise la pression et la température en s'apparentant aux conditions géologiques terrestres réelles qui permettent de produire de l'huile brute. Il ne faut cependant que quelques heures plutôt que des millions d'années. (FORGE Hydrocarbons, s. d.)

Les étapes du processus sont schématisées à la figure 6.9. En premier, les huiles ou les graisses sont mélangées avec de l'eau et chauffées à haute température pour en produire des acides gras et du glycérol via hydrolyse. Celui-ci est ensuite retiré alors que les acides gras seront chauffés une fois supplémentaire jusqu'à 400 °C pour en retirer l'oxygène. C'est de cette façon, par pyrolyse, que les hydrocarbures seront fabriqués. (Metella, 2017; Xia, Omidghane, Chae et C. Bressler, 2015)



**Figure 6.9 : Procédé LTH** (tiré de : Green Car Congress, 2013)

La compagnie affirme pouvoir produire un diesel renouvelable à faible coût en évitant l'utilisation d'hydrogène et d'un catalyseur. Les procédés usuels, qui requièrent les précédents éléments, nécessitent une matière première très pure tels que le canola, le soja ou le maïs. La méthode LTH, quant à elle, accepte les graisses brunes comme les huiles de cuissons usées qui comportent beaucoup d'impuretés et dont le prix est inférieur. (Metella, 2017) C'est donc de cette façon que FORGE Hydrocarbons affirme pouvoir réduire les coûts de 30 % (FORGE Hydrocarbons, s. d.). La compagnie possède une usine pilote à Edmonton qui, à capacité maximale, devrait produire 19 millions de litres par année. (Croucher, 2018, 17 janvier) La technologie pourrait également permettre de réduire de 90 % les émissions de GES comparativement aux carburants conventionnels. (Metella, 2017)

## 6.5 Analyse comparative

Plusieurs matières premières et procédés permettent de produire des carburants alternatifs. Les quatre finalistes du défi « Visez haut! » en sont la preuve, mais ces technologies sont-elles viables à long terme et peuvent-elles s'appliquer au marché du transport aérien? Pour tenter de répondre à ces questions et de départager ces technologies, une analyse comparative a été effectuée.

### 6.5.1 Résultats et discussion

Une revue de la littérature a permis de brosser le portrait de chaque procédé tels qu'ils ont été décrits dans les sections précédentes. Le tableau 6.2 résume les avantages et inconvénients les plus évidents qui sont ressortis de cette recherche.



**Tableau 6.2 : Analyse comparative** (compilation d'après : Fradette et al., 2017, juillet; Plourde, 2019, 15 avril; W. Keith et al., 2018; Stolte, 2018, 19 février; Biello, 2011; Xia et al., 2015; Metella, 2017)

	Avantages	Inconvénients
<b>Carbon Engineering</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité et coût de la matière première</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technologie coûteuse</li> <li>• Construction d'infrastructures importantes nécessaires</li> </ul>
<b>Consortium SAF+</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité et coût de la matière première</li> <li>• Requier peu de main-d'œuvre durant les opérations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technologie coûteuse</li> </ul>
<b>Enerkem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence avec l'enfouissement</li> <li>• Valorisation des déchets</li> <li>• Faible coût de la matière première</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matière première qui varie selon le contexte géographique et le temps</li> <li>• Construction d'infrastructures importantes nécessaires</li> </ul>
<b>FORGE Hydrocarbons</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité d'utiliser des huiles de mauvaise qualité</li> <li>• Aucun besoin en hydrogène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité de la matière première basée sur la production alimentaire</li> <li>• Coût élevé de la matière première</li> <li>• Procédé à hautes températures et pressions</li> </ul>

#### *Prix de la matière première*

Le prix de vente des biocarburants est très sensible au coût de la matière première. Par exemple, dans le cas des huiles et des graisses, le prix de la matière première constitue près de 80 % des coûts totaux. (IRENA, 2017). Les procédés utilisant le CO<sub>2</sub> comme ressource ont ainsi un net avantage, car aucun coût n'y est rattaché. Il est présent dans l'air et c'est tout. Du côté des matières résiduelles, le prix est également avantageux, car il est principalement dicté par le coût d'enfouissement. Pour les municipalités, dévier les déchets du dépotoir est une alternative qui pourrait être économiquement attrayante en raison des taxes associées à l'enfouissement (European Technology and Innovation Platform, s. d.). Cela pourrait donc favoriser Enerkem. Les huiles usées, quant à elles, sont parmi les ressources les plus dispendieuses tel que vu à la figure 6.2. Cependant, il est possible de croire qu'avec la technologie LTH, des huiles de moins bonne qualité, et donc moins chères, pourraient être utilisées.

#### *Disponibilité de la matière première*

Dans la perspective d'approvisionner le secteur aérien, il est primordial de répondre à la demande. La disponibilité en matière première doit donc être suffisante pour subvenir à la croissance marquée de l'industrie. Les technologies de capture et séquestration de CO<sub>2</sub> partent ainsi avec un avantage puisque la quantité de matières premières n'est pas limitée. Dans le cas d'Enerkem, il existe une variabilité dans la quantité et dans le contenu des déchets selon le contexte géographique et temporel. Leur composition instable pourrait affecter le rendement de la compagnie. Pour FORGE Hydrocarbons, la disponibilité de la matière première est basée sur la demande alimentaire. Il a déjà été démontré qu'en Amérique du Nord,

les ressources en huiles usagées et en autres matières grasses devraient augmenter de manière marginale d'ici 2040. (Pavlenko, 2017) Quoi qu'il en soit, aucun des procédés présentés n'est actuellement en mesure, à lui seul, de répondre à la demande du secteur aérien. Ils en sont tous au stade de développement et il n'est pas possible d'affirmer avec certitude lesquels seront en mesure de maintenir leur succès à plus grande échelle.

#### *Procédé de fabrication*

Chaque finaliste possède des caractéristiques particulières associées à son procédé de fabrication. Dans le cas de la capture du CO<sub>2</sub>, même si aucun coût n'est rattaché à la matière première, c'est un procédé technologique qui est considéré comme très dispendieux (Plourde, 2019, 15 avril). Il faut toutefois accueillir cette affirmation avec un bémol puisqu'il existe une grande incertitude concernant les coûts de production et qu'il est difficile d'estimer à combien ceux-ci s'élèveront dans un contexte de production à grande échelle. De plus, le déploiement à grande échelle du procédé de Carbon Engineering demanderait la construction d'importantes infrastructures. La compagnie aimerait voir ses usines au même titre que les stations de traitement d'eau, ce qui demanderait des investissements majeurs de plusieurs centaines de millions de dollars (Plourde, 2019, 15 avril). Les infrastructures de Consortium SAF+ devraient être de moindre envergure puisque la technologie prévoit capter le CO<sub>2</sub> directement à partir des cheminées des entreprises polluantes (Duval, 2019, 29 mai). La technologie de l'Université d'Alberta utilisée par FORGE Hydrocarbon possède des avantages intéressants. Effectivement, le processus permet de valoriser des huiles de moins bonne qualité qui autrement, n'auraient peut-être pas de débouchés. Toutefois, pour arriver au résultat, de hautes températures et pressions sont nécessaires ce qui représente une grande consommation d'énergie.

#### **6.5.2 Contraintes et limites de l'analyse comparative**

Les procédés présentés à la section 6.4 sont très récents et actuellement en cours de développement. Les informations publiées jusqu'à maintenant sont donc minimales. Les niveaux de maturité des technologies qui diffèrent rendent également difficile la comparaison des procédés sur un pied d'égalité. Pour toutes ces raisons, plusieurs facteurs n'ont pas été considérés lors de l'analyse.

L'important critère des coûts de production n'a pas pu être évalué puisque l'information n'était pas disponible pour tous les procédés. Par ailleurs, les données actuelles sont des données expérimentales qui risquent d'être altérées par la production à grande échelle et la construction d'infrastructures. De plus, la compétition avec les autres secteurs, particulièrement le transport routier, n'a pas été considérée. C'est en effet un élément important qui influence la quantité de matières premières qui serait réellement disponible pour le secteur aérien. Jusqu'à présent, il est raisonnable d'affirmer qu'une proportion significative des ressources serait dédiée au transport routier plutôt qu'au transport aérien en raison des coûts de production élevés liés à la fabrication de SAF. (El Takriti et al., 2017)

La performance environnementale, en termes de réduction de CO<sub>2</sub>, n'a pas été considérée. Jusqu'à maintenant, on estime que la technologie de capture et séquestration de CO<sub>2</sub> est celle qui mènerait à de plus grandes réductions d'émissions (près de 90%) comparativement aux carburants dérivés d'énergies fossiles. Les procédés utilisant les déchets, les graisses animales et les huiles usagées pourraient permettre des réductions entre 50 % et 80 %. (El Takriti et al., 2017) Cependant, pour départager les procédés des quatre finalistes, d'autres études plus précises et spécifiques, telles que des analyses de cycle de vie, seront nécessaires une fois la commercialisation entamée. Un autre aspect qui pourrait être intégré dans la performance environnementale est la consommation des ressources secondaires comme l'eau, l'électricité ou le gaz naturel. L'apport de ces sources d'énergie n'a pas pu être pris en compte par manque de données.

Dans une perspective de développement durable, il aurait été pertinent d'évaluer les possibles effets rebonds des différents procédés ainsi que leur niveau d'acceptabilité sociale, mais il n'existe pas encore assez d'informations sur le sujet.

## **7. RECOMMANDATIONS**

Les chapitres précédents présentent un survol des différents enjeux associés à la décarbonisation du transport aérien et donc à sa transformation. Cet essai a permis de relever certaines problématiques tout en mettant en lumière des pistes d'améliorations. Il est ainsi possible d'émettre des recommandations à l'intention de l'OACI et du gouvernement du Canada qui gèrent respectivement l'aviation civile internationale et nationale.

### **7.1 À l'intention de l'OACI à l'égard de l'aviation civile internationale**

La plupart des recommandations adressées à l'OACI concernent le programme de compensation CORSIA puisqu'il se retrouve sous sa responsabilité. Cela démontre l'importance du programme dans la stratégie de l'industrie pour réduire son impact environnemental.

- **Déterminer des critères clairs et rigoureux quant à l'éligibilité des crédits de compensation dans le cadre du programme CORSIA**

Les études présentées dans le chapitre 5 démontrent l'importance des critères d'éligibilité dans la réussite et la crédibilité du secteur aérien à réduire son impact environnemental. L'additionnalité ainsi que la vulnérabilité des projets sont des éléments déterminants afin d'obtenir de réelles réductions d'émissions de GES.

- **Élaborer une méthodologie claire pour éviter le risque de double comptage**

Le lancement du programme CORSIA devrait être accompagné d'une méthodologie claire afin de minimiser le risque de double comptage des crédits de compensation. Sans mesures de mitigation en place, le risque de double revendication pourrait affecter les engagements des pays sous l'Accord de Paris et la réussite du programme CORSIA.

- **Renforcer les critères d'éligibilité pour les carburants alternatifs durables au programme CORSIA**

Pour l'instant, les critères associés à l'éligibilité des carburants alternatifs au programme CORSIA ne sont pas suffisants pour s'assurer que des SAF moins polluants que les combustibles fossiles seront utilisés. Il est aussi primordial que le changement d'affectation des terres soit inclus dans les analyses de cycle de vie pour rendre compte des économies réelles en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>.

- **Évaluer la possibilité de taxation pour le transport aérien international**

De façon générale, le transport aérien international est beaucoup moins taxé que le transport aérien national. Pour ajuster ce déséquilibre, l'industrie devrait évaluer la possibilité de taxer le transport international. Pour ce faire, il existe plusieurs alternatives tel que vu au chapitre 5. De plus, afin d'éviter les distorsions de marché, il est préférable qu'une décision multilatérale soit prise.

- **Effectuer une nouvelle étude globale sur les impacts du secteur aérien sur le réchauffement climatique**

L'industrie se base encore, dans de nombreux documents, sur l'étude réalisée par le GIEC en 1999 en ce qui concerne les impacts du secteur sur l'environnement. À cette époque, le manque de données ne permettait pas d'évaluer avec précision la contribution des traînées de condensation sur le forçage radiatif total de l'aviation. Depuis, plusieurs recherches ont été réalisées et ont démontré que cet apport n'est pas négligeable, mais bien au contraire, significatif (Kärcher, 2018). Une nouvelle étude globale permettrait au secteur de mieux comprendre les conséquences des effets non-CO<sub>2</sub> sur le climat et de les mettre en perspective par rapport aux émissions de CO<sub>2</sub>.

## **7.2 À l'intention du gouvernement du Canada à l'égard de l'aviation civile nationale**

Un des pouvoirs du gouvernement est d'orienter la population vers des choix plus responsables à travers l'adoption de politiques nationales. De manière générale, le Canada devrait étendre ses politiques au secteur aérien pour que celles-ci aient des répercussions dans le domaine de l'aviation.

- **Redéfinir les objectifs et le calendrier du Plan d'action du Canada pour réduire les émissions de GES provenant de l'aviation**

Le plan d'action actuel ne permet pas d'effectuer un suivi adéquat des mesures présentées. Il faudrait redéfinir des objectifs mesurables et quantifiables en plus d'établir un échéancier avec des jalons. Cela permettrait d'évaluer la progression des efforts et l'état d'avancement du plan.

- **Intégrer au Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (et à la Norme sur les carburants propres) le carburant destiné aux vols domestiques**

Pour soutenir la décarbonisation du secteur aérien, le gouvernement devrait appliquer le CPC et donc la NCP aux carburants dédiés au transport domestique. Cette mesure permettrait de rendre plus attractifs les carburants alternatifs durables pour le secteur aérien canadien.

- **Développer et implanter des politiques nationales pour promouvoir le développement des biocarburants**

Pour le moment, la production de biocarburant est beaucoup plus dispendieuse que l'achat de crédits de carbone ce qui représente un obstacle au déploiement des SAF et à la décarbonisation du secteur. (Pavlenko, 2017) Pour cette raison, le gouvernement devrait élaborer et implanter une ou des politiques visant à favoriser le développement et l'utilisation des SAF dans le secteur aérien. (Larsson et al., 2019, janvier)

### 7.3 Recommandations générales

Les recommandations qui s'appliquent aux deux entités ont été regroupées dans cette section.

- **Mettre en place des mesures visant à réduire les effets non-CO<sub>2</sub> qui contribuent également au réchauffement climatique**

De façon générale, autant à l'échelle internationale que nationale, les mesures en place visent surtout les émissions de CO<sub>2</sub>. Toutefois, d'autres éléments contribuent aussi au réchauffement climatique et lorsque ceux-ci sont pris en compte, le forçage radiatif associé aux activités aériennes s'élève à près de 5 % (Larsson et al., 2019, janvier). Dans l'objectif de minimiser la hausse des températures, il apparaît nécessaire de mettre en place des mesures pour couvrir également ces éléments.

- **Considérer les interactions entre les taxes et les systèmes de droits d'échanges dans les décisions liées à l'implantation de nouvelles mesures**

L'introduction de nouveaux systèmes, comme le programme CORSIA ou la taxe carbone au Canada, a nécessairement des impacts sur d'autres mesures déjà en place. Il est important d'adopter une approche globale pour évaluer ces interactions. Par exemple, les systèmes de droits et d'échange existants ne visent en majorité que le CO<sub>2</sub> alors qu'une taxe en aviation adresse aussi bien les conséquences liées aux effets non-CO<sub>2</sub> (Forsyth, 2018). Ces mesures ont des objectifs différents et peuvent être utilisées de façon complémentaire. Il est donc nécessaire de considérer ces interactions dans les prises de décisions pour comprendre quel sera l'effet global.

## CONCLUSION

La proportion des émissions de GES associées au transport aérien devrait augmenter de façon significative d'ici 2050 selon les prévisions du trafic aérien. Pour respecter les cibles de l'Accord de Paris et ainsi limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C d'ici la fin du siècle, l'industrie aérienne se doit de fournir des efforts considérables pour diminuer son empreinte carbone. Pour y arriver, elle s'est dotée de cibles ambitieuses et d'une stratégie environnementale basée sur un « panier de mesures ». L'industrie sait déjà que les avancées technologiques et l'amélioration de la gestion du trafic aérien seront insuffisantes pour contrebalancer la croissance du secteur dans les années à venir. C'est pourquoi la stratégie de l'industrie repose principalement sur la tarification du carbone, via le déploiement du programme de compensation CORSIA, et le développement des carburants alternatifs.

L'objectif de cet essai était d'identifier des solutions ainsi que des améliorations afin de faciliter la décarbonisation du transport aérien à l'échelle nationale et internationale. Pour ce faire, la tarification du carbone ainsi que le développement des carburants alternatifs ont été évalués. D'une part, l'applicabilité de la tarification du carbone au secteur, par la taxe carbone et le marché du carbone, a été réalisée. Cela a permis de mettre en lumière le déséquilibre qui existe entre le transport national et international au niveau de la taxation. Au Canada, l'implantation de la taxe carbone suscite de fortes réactions à travers le pays. C'est pourquoi le gouvernement doit faire preuve de transparence quant à l'usage de ces revenus s'il veut favoriser son acceptabilité sociale. D'autre part, l'évaluation du programme CORSIA a mis en évidence le risque de double comptage des crédits de carbone et la difficulté d'induire de réelles réductions d'émissions via la compensation. Le choix des critères d'éligibilité au programme CORSIA aura aussi un impact direct sur la quantité et la qualité des crédits de carbone disponibles. L'analyse a également permis de soulever le problème d'incompatibilité entre le programme CORSIA et le système EU ETS. Aucune décision n'a été prise jusqu'à maintenant, mais plusieurs options existent. Les parties prenantes impliquées devront considérer le fait que les quantités d'émissions de GES réduites varieront selon l'alternative choisie puisque les deux systèmes possèdent des seuils différents.

Plusieurs obstacles se dressent devant la commercialisation des carburants alternatifs dédiés aux aéronefs, dont la disponibilité de la matière première, les coûts de production élevés et la compétition avec les autres secteurs. Parmi les quelques procédés certifiés par la norme ASTM, un seul est produit selon une échelle commerciale. Il est ainsi peu probable que l'objectif de croissance neutre du secteur dès 2020 soit atteint puisque, selon l'OACI, celle-ci nécessiterait le remplacement du kérosène dans sa totalité. En réalité, cette situation est fortement improbable en raison des ressources disponibles et de la compétition avec le transport routier. L'intérêt grandissant pour les SAF, de la part de la communauté aéronautique, se traduit par de nombreuses activités de recherche et de développement. À cet effet, les finalistes du défi canadien « Visez haut! » ont été présentés. Bien que leurs technologies semblent prometteuses, il est difficile de les départager à l'heure actuelle en raison du peu d'informations rendues

publiques et des stades de maturité différents. Quoi qu'il en soit, un des principaux défis représente le passage à la production à grande échelle tout en maintenant des coûts de production raisonnables.

À la suite de ces analyses, des recommandations ont pu être formulées. Avec le déploiement du programme CORSIA, l'OACI devrait déterminer des critères clairs pour l'éligibilité des crédits de compensation et des SAF. Ceux-ci seront déterminants dans la réussite et la crédibilité du programme. Une méthodologie devrait aussi être mise sur pied pour adresser le risque de double comptage des crédits de carbone. Par ailleurs, l'industrie pourrait évaluer la possibilité d'imposer une taxe au transport aérien international pour ajuster le déséquilibre face au transport national. À l'échelle canadienne, le gouvernement devrait redéfinir son plan d'action pour réduire les émissions de GES liés aux activités aériennes en déterminant des objectifs mesurables et quantifiables et en établissant un échéancier pour améliorer le suivi des efforts. Pour aider à la décarbonisation du secteur, le Canada devrait mettre en place des politiques pour favoriser l'utilisation et le développement des SAF. C'est pourquoi il serait préférable d'appliquer le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques et la Norme sur les combustibles propres aux carburants destinés aux aéronefs. De manière générale, les effets non-CO<sub>2</sub> devraient être pris en compte dans les mesures déployées, car présentement les efforts sont majoritairement dirigés vers les émissions de CO<sub>2</sub> seulement. Ainsi, dans l'objectif de mieux comprendre les répercussions de ces effets non-CO<sub>2</sub> dans le forçage radiatif total de l'aviation, une étude globale pourrait être reconduite depuis la dernière réalisée par le GIEC en 1999.

Bref, c'est sans surprise que le trafic aérien a connu une augmentation exponentielle depuis les dernières décennies. Le transport aérien a permis aux individus de repousser leurs limites, d'élargir leurs horizons et de découvrir des facettes du monde qu'ils n'avaient encore jamais explorées. L'aviation civile a contribué à façonner le monde d'aujourd'hui. Ces bénéfices se paient toutefois par un impact environnemental grandissant qui menace, à plus long terme, la survie humaine. Dans cette lutte contre les changements climatiques, il est facile pour le voyageur de pointer du doigt l'industrie aérienne, mais peut-être la responsabilité du changement le plus difficile lui incombe-t-elle avant tout : revoir sa perception du transport aérien et réfléchir à son rôle en tant que consommateur. Prendre l'avion est-il réellement un besoin ou plutôt un privilège?



## RÉFÉRENCES

- Actu-Environnement. (s. d.). *Biomasse*. Repéré à [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/biomasse.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse.php4)
- Adamski, B. K. et Fisher, R. (2015). *Aviation*. Repéré à L'Encyclopédie canadienne: <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/aviation-3>
- Aeroflot. (s. d.). *Glossary*. Repéré à [https://ir.aeroflot.com/fileadmin/user\\_upload/files/eng/glossary\\_eng.pdf](https://ir.aeroflot.com/fileadmin/user_upload/files/eng/glossary_eng.pdf)
- Agence environnementale de l'Allemagne. (2019). *Offset credit supply potential for CORSIA*. Repéré à <https://newclimate.org/2019/11/05/offset-credit-supply-potential-for-corsia/>
- Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA). (2019a). *Air quality*. Repéré à <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/adapting-changing-climate/air-quality>
- Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA). (2019b). *Rapport environnement de l'aviation européenne 2019*. Repéré à [https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr\\_uploaded/219473\\_EAER\\_EXECUTIVE\\_SUMMARY\\_FR.pdf](https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EAER_EXECUTIVE_SUMMARY_FR.pdf)
- Agence France-Presse. (2019). *Face aux critiques sur sa réputation de pollueur, le transport aérien se rebiffe*. Repéré à France 24: <https://www.france24.com/fr/20190604-face-critiques-reputation-pollueur-le-transport-aerien-rebiffe>
- Agence internationale de l'énergie. (2016). *CO2 Emissions Statistics*. Repéré à <https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>
- Agence internationale de l'énergie renouvelable (IRENA). (2017). *Biofuels for aviation*. Repéré à <https://www.irena.org/publications/2017/Feb/Biofuels-for-aviation-Technology-brief>
- Air Transport Action Group (ATAG). (2017). *Beginner's guide to sustainable aviation fuel*. Repéré à [https://aviationbenefits.org/media/166152/beginners-guide-to-saf\\_web.pdf](https://aviationbenefits.org/media/166152/beginners-guide-to-saf_web.pdf)
- Air Transport Action Group (ATAG). (2018a). *Aviation benefits beyond borders*. Repéré à [https://aviationbenefits.org/media/166344/abbb18\\_full-report\\_web.pdf](https://aviationbenefits.org/media/166344/abbb18_full-report_web.pdf)
- Air Transport Action Group (ATAG). (2018b). *Facts & figures*. Repéré à <https://www.atag.org/facts-figures.html>
- Air Transport Action Group (ATAG). (2019). *Aviation 2050 goal and the Paris Agreement*.
- Airbus. (2018). *Global networks, global citizens*. Repéré à <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/media-day/GMF-2018-2037.pdf>
- Airbus. (2019). *A220-100*. Repéré à <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a220-family/a220-100/a220-100-fr.html>
- Alam, F., Mobin, S. et Chowdhury, H. (2015). Third generation biofuel from Algae. *Procedia Engineering*, 105, pp. Page 763-768. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815008656>
- Alberola, E., Caneill, J.-Y., Cecchetti, F., Marcu, A., Mazzoni, M., Schleicher, S., . . . Vangenechten, D. (2019). *L'état du marché carbone européen : Édition 2019*. Repéré à <https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2019/06/0617-i4ce-Etude-EtatMarcheCarboneEurope.pdf>

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). *Development of New ASTM Specifications - Discussion Forum Summary*. Repéré à <https://www.astm.org/COMMIT/D02%20New%20Specifications%20Forum%20Summary.pdf>
- Arthur Lee, R. et Lavoie, J.-M. (2013). From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers*, 3(2). Repéré à <https://academic.oup.com/af/article/3/2/6/4638639>
- Association des chemins de fer du Canada. (2016). *Surveillance des émissions de locomotives*. Repéré à <https://www.railcan.ca/fr/initiatives-de-lacfc/programme-de-surveillance-des-emissions-de-locomotives/>
- Association internationale du transport aérien (IATA). (2018a). *20 - Year air passenger forecast*.
- Association internationale du transport aérien (IATA). (2018b). L'IATA prévoit 8,2 milliards de voyageurs aériens en 2037. Repéré à <https://www.iata.org/pressroom/pr/Documents/2018-10-24-02-fr.pdf>
- Association internationale du transport aérien (IATA). (2019). *Le fort trafic de passagers se maintient en 2018 Nouveau record du coefficient d'occupation des sièges*. Repéré à <https://www.iata.org/pressroom/pr/Documents/2019-01-07-01-fr.pdf>
- Association internationale du transport aérien (IATA). (s. d.a). *Carbon Offsetting Scheme for International Aviation (CORSIA)*. Repéré à <https://www.iata.org/policy/environment/Pages/corsia.aspx>
- Association internationale du transport aérien (IATA). (s. d.b). *Taxation*. Repéré à <https://www.iata.org/policy/Pages/taxation.aspx>
- Association internationale du transport aérien (IATA) et School of internationales futures. (2018). *Futur of the airline industry 2035*. Repéré à <https://www.iata.org/policy/Documents/iata-future-airline-industry.pdf>
- Australian border force. (2018). *Passenger Movement Charge (PMC)*. Repéré à [https://www.abf.gov.au/entering-and-leaving-australia/crossing-the-border/passenger-movement/passenger-movement-charge-\(pmc\)](https://www.abf.gov.au/entering-and-leaving-australia/crossing-the-border/passenger-movement/passenger-movement-charge-(pmc))
- Aviation environment federation. (2016). *Aircraft noise and public health : the evidence is loud and clear*. Repéré à [https://www.aef.org.uk/uploads/AEF\\_aircraft-noise-and-health\\_FINAL\\_Web-1.pdf](https://www.aef.org.uk/uploads/AEF_aircraft-noise-and-health_FINAL_Web-1.pdf)
- Bannon, E. (2019). *Shipping climate talks in the slow lane over speed reduction measures*. Repéré à Transport & Environnement: <https://www.transportenvironment.org/press/shipping-climate-talks-slow-lane-over-speed-reduction-measures>
- Banque mondiale. (2019). *State and Trends of Carbon Pricing 2019*. Repéré à <http://documents.worldbank.org/curated/en/191801559846379845/State-and-Trends-of-Carbon-Pricing-2019>
- Banque mondiale. (s. d.). *Pricing Carbon*. Repéré à <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>
- Belzile, G. (2019, 8 juillet). Taxer le carbone de la bonne manière. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/debats/opinions/201907/07/01-5233055-taxer-le-carbone-de-la-bonne-maniere.php>
- Biello, D. (2011). Garbage in, Energy out: Turning Trash into Biofuel. *Scientific American*. Repéré à <https://www.scientificamerican.com/article/biello-turning-trash-into-biofuel/>

- Boag, P. (2019). *La transparence est de mise quant à la Norme sur les combustibles propres*. Repéré à Association canadienne des carburants: <https://www.canadianfuels.ca/Opinions/Mai-2019/>
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., . . . Stevens, B. (2013). *Clouds and aerosols*. Repéré à [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter07\\_FINAL-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter07_FINAL-1.pdf)
- Brady, A. (2017). *Comment la technologie évolue dans les airs*. Repéré à <https://www.iso.org/fr/news/2017/01/Ref2155.html>
- Brain, D. (2019). The ICAO Aviation System Block Upgrade (ASBU) Framework. *Uniting aviation*. Repéré à <https://www.unitingaviation.com/regions/eurnat/the-icao-aviation-system-block-upgrade-asbu-framework/>
- Breteau, P. (2019, 11 juillet). « Ecotaxe » sur l'avion, une goutte d'eau dans le prix des billets. *Le Monde*. Repéré à [https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/07/11/ecotaxe-sur-l-avion-une-goutte-d-eau-dans-le-prix-des-billets\\_5488274\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/07/11/ecotaxe-sur-l-avion-une-goutte-d-eau-dans-le-prix-des-billets_5488274_4355770.html)
- Brimont, G. (2017). *Le biocarburant dans le secteur aérien : vers des vols plus verts?* Repéré à <https://www.transportshaker-wavestone.com/le-biocarburant-dans-le-secteur-aerien-vers-des-vols-plus-verts/>
- Carbon Engineering. (2019). *Our technology*. Repéré à <https://carbonengineering.com/our-technology/>
- CE Delft. (2018). *A study on aviation tickets taxes*. Repéré à <https://www.ce.nl/en/publications/2208/a-study-on-aviation-ticket-taxes>
- CE Delft. (2019). *Taxes in the field of aviation and their impact*. Commission européenne. Repéré à <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0b1c6cdd-88d3-11e9-9369-01aa75ed71a1>
- Centre for Asia Pacific Aviation. (2019). *"Flight Shame" and the Jet Fuel Tax Threat*. Repéré à <https://centreforaviation.com/analysis/reports/flight-shame-qnd-the-jet-fuel-tax-threat-495229>
- Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique. (2017). *Les émissions liées à l'utilisation des terres, aux changements d'affectation des terres et foresterie (UTCATF)*. Repéré à <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/analyse-sectorielle/foret>
- Chalifour, N. J. et Besco, L. (2018). *Taking Flight : Federal action to mitigate Canada's GHG emissions from aviation*. Repéré à [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3168671](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3168671)
- Charest, J. (2019). *Cap sur un nouvel horizon*. Repéré à <https://aiac.ca/fr/vision2025/>
- Chiambaretto, P. (2019, 8 mai). Trafic aérien mondial, une croissance fulgurante pas prête de s'arrêter. *The Conversation*. Repéré à <https://theconversation.com/trafic-aerien-mondial-une-croissance-fulgurante-pas-prete-de-sarreter-116107>
- Chiaromonti, D. (2019, février). Sustainable aviation fuels : the challenge of decarbonization. *Energy Procedia*, 158, pp. Page 1202-1207. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219303285>
- Civil Air Navigation Services Organisation et Conseil international des aéroports (ACI). (2015). *Managing the impacts of aviation noise*. Repéré à [https://www.canso.org/sites/default/files/Managing%20the%20Impacts%20of%20Aviation%20Noise\\_HQ.pdf](https://www.canso.org/sites/default/files/Managing%20the%20Impacts%20of%20Aviation%20Noise_HQ.pdf)

- Climate action tracker. (2019). *Canada*. Repéré à <https://climateactiontracker.org/countries/canada/>
- Climate transparency. (2018). *Brown to Green : The G20 transition to a low-carbon economy (2018)*. Repéré à <https://www.climate-transparency.org/g20-climate-performance/g20report2018>
- CO2 Solutions. (s.d.). *Projects*. Repéré à <https://co2solutions.com/en/projects/>
- Cohen, C. (2019, 13 mai). Aérien: la Commission européenne planche sur une taxe kérosène. *Le Figaro*. Repéré à <http://www.lefigaro.fr/conjoncture/aerien-la-commission-europeenne-planche-sur-une-taxe-kerosene-20190513>
- Commission européenne. (2017). *Final Evaluation of the SESAR Joint Undertaking (2014-2016) operating under the SESAR 1 Programme (FP7)*. Repéré à <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/4084.pdf>
- Commission européenne. (2019). *Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)*. Repéré à <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>
- Connaissance des énergies. (2011). *Gazéification*. Repéré à <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>
- Conseil international des aéroports (ACI) et al. (2017). *Aviation benefits*. Repéré à <https://www.icao.int/sustainability/Documents/AVIATION-BENEFITS-2017-web.pdf>
- Conseil national des lignes aériennes du Canada (CNLA). (2017). *Un mécanisme de compensation des émissions de carbone pour l'aviation canadienne*. Repéré à <https://airlinecouncil.ca/wp-content/uploads/2017/11/Backgrounder-CORSIA-FR.pdf>
- Conseil national des lignes aériennes du Canada (CNLA). (2019). *Backgrounder : Evaluation of carbon tax backstop cost on domestic air travel (2019-2030)*. Repéré à <https://airlinecouncil.ca/wp-content/uploads/2019/01/NACC-Backgrounder-Backstop-Evaluation.pdf>
- Croucher, C. (2018, 17 janvier). Forging new sources for biofuels and hydrocarbon-based products. *Troy Media*. Repéré à <https://troymedia.com/technology/forged-hydrocarbons-fat-into-fuel/>
- Dancer, M. (2019, 9 octobre). Comment le transport maritime cherche à réduire ses émissions de CO2. *La Croix*. Repéré à <https://www.la-croix.com/Economie/Comment-transport-maritime-cherche-reduire-emissions-CO2-2019-10-09-1201053146>
- Décarie, J.-P. (2019, 19 septembre). CO2 Solutions a besoin d'air. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/affaires/201909/18/01-5241858-co2-solutions-a-besoin-dair.php>
- DeCicco, J. M., Yuqiao Liu, D., Heo, J., Krishnan, R., Kurthen, A. et Wang, L. (2016). Carbon balance effects of U.S. biofuel production and use. *Climate Change*, 138(3-4), pp. Page 667-680. Repéré à <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1764-4>
- Delbosc, A. et De Perthuis, C. (2009). *Les marchés du carbone expliqués*. Repéré à <https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2015/10/09-09-C4C-Les-march%C3%A9s-du-carbone-expliqu%C3%A9s.pdf>
- Deloitte. (2019). *Canadian indirect tax news : Federal Carbon Backstop*. Repéré à [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/tax/ca-en-tax-CITN-federal-carbon-backstop\\_AODA.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/tax/ca-en-tax-CITN-federal-carbon-backstop_AODA.pdf)
- Dictionnaire environnement. (s.d.). *Effet de serre la définition du dico*. Repéré à [https://www.dictionnaire-environnement.com/effet\\_de\\_serre\\_ID282.html](https://www.dictionnaire-environnement.com/effet_de_serre_ID282.html)

- Dignat, A. (2019). *17 décembre 1903 : premiers vols des frères Wright*. Repéré à Herodote: [https://www.herodote.net/17\\_decembre\\_1903-evenement-19031217.php](https://www.herodote.net/17_decembre_1903-evenement-19031217.php)
- DNV GL. (2017). *DNV GL 2017 maritime forecast to 2050*. Repéré à [https://issuu.com/maritimeprofessionals.net/docs/dnv\\_gl\\_eto-2017\\_maritime\\_forecast\\_t](https://issuu.com/maritimeprofessionals.net/docs/dnv_gl_eto-2017_maritime_forecast_t)
- Domergue, F. (2009). Performance industrielle et démarche « développement durable » dans l'aéronautique : le cas SNECMA. *Management & Avenir*(29), p. p. 275 à 292.
- Dostaler, I., Sabbane, L., Stein, C. et Tomberlin, J. (2008). *Profil de la demande de transport aérien régional de passagers au Québec et tendances*. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0964863.pdf>
- Duval, A. (2019, 29 mai). Un carburant du Québec pour rendre les avions moins polluants? *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1172097/carburant-durable-quebecois-aviation-civile-defi-visez-haut>
- El Takriti, S., Pavlenko, N. et Searle, S. (2017). *Mitigating international aviation emissions*. Repéré à [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Aviation-Alt-Jet-Fuels\\_ICCT\\_White-Paper\\_22032017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Aviation-Alt-Jet-Fuels_ICCT_White-Paper_22032017_vF.pdf)
- Encyclopædia Britannica. (s.d.). *The Jet Age*. Repéré à <https://www.britannica.com/technology/history-of-flight/The-jet-age>
- Energies 2050. (s.d.). *Les marchés du carbone*. Repéré à <https://energies2050.org/ethicarbon/les-marches-du-carbone/>
- Enerkem. (s. d.a). *Biocarburants et produits chimiques verts à partir de déchets*. Repéré à <https://enerkem.com/fr/a-propos/aperçu/>
- Enerkem. (s. d.b). *Enerkem Alberta biofuels*. Repéré à <https://enerkem.com/fr/usines/enerkem-alberta-biofuels/>
- Enerkem (Réalisateur). (s. d.c). *Utiliser vos déchets pour faire rouler votre voiture* [Vidéo en ligne]. Repéré à [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=236&v=OoOtWGTf2YI&feature=emb\\_title](https://www.youtube.com/watch?time_continue=236&v=OoOtWGTf2YI&feature=emb_title)
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2015). *Impacts des changements climatiques*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/impacts.html>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2016). *Deuxième rapport biennal du Canada sur les changements climatiques*. Repéré à [http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2016/eccc/En1-63-2016-fra.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/En1-63-2016-fra.pdf)
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2017a). *7e communication nationale sur les changements climatiques et 3e rapport biennal du Canada*. Repéré à [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2951380\\_Canada-NC7-BR3-2-Can7thNComm3rdBi-Report\\_FR.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2951380_Canada-NC7-BR3-2-Can7thNComm3rdBi-Report_FR.pdf)
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2017b). *Norme sur les carburants propres : document de travail*. Repéré à [https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/D7C913BB-13D0-42AF-9BC7-FBC1580C2F4B/NCP\\_document\\_de\\_travail\\_2017-02-24-fra.pdf](https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/D7C913BB-13D0-42AF-9BC7-FBC1580C2F4B/NCP_document_de_travail_2017-02-24-fra.pdf)

- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2018a). *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques : deuxième rapport annuel synthèse de la mise en œuvre*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/cadre-pancanadien-rapports/deuxieme-rapport-annuel.html>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2018b). *Norme sur les combustibles propres : document de conception réglementaire*. Repéré à <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/CFS%20-%20Cost%20benefit%20analysis%20framework-FR.pdf>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2018c). *Projections des émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques au Canada*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/projections-2018.html>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2019a). *Norme sur les combustibles propres : approche réglementaire proposée*. Repéré à <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/pricing-pollution/Clean%20Fuel%20Standard%20-%20Proposed%20Regulatory%20Approach%20June%202019%20FR.pdf>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2019b). *Rapport d'inventaire national (1990-2017) : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/inventaire.html>
- Environnement et Lutte contre les changements climatiques. (s. d.). *Marché du carbone*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/definitions.htm>
- European Technology and Innovation Platform. (s. d.). *MSW as a feedstock for biofuels production*. Repéré à ETIP Bioenergy: <http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/feedstocks/waste/municipal-solid-waste-msw>
- FCC Aviation. (s.d.). *Norwegian Air Passenger Tax*. Repéré à <https://www.fccaviation.com/regulation/norway/air-passenger-tax>
- FORGE Hydrocarbons. (s. d.). *Renewable fuels technology*. Repéré à <http://www.forgehc.com/>
- Forrest, M. (2019, 30 juillet). "A unified message": Provinces move to synchronize battle plans against carbon tax. *National Post*. Repéré à <https://nationalpost.com/news/politics/a-unified-message-provinces-move-to-synchronize-battle-plans-against-carbon-tax>
- Forsyth, P. (2018). *Aviation Taxes – Impacts, Costs and Benefits*. Repéré à [http://greenfiscalspolicy.org/wp-content/uploads/2019/06/1560238770\\_AviationTaxesImpactsCostsandBenefits.pdf](http://greenfiscalspolicy.org/wp-content/uploads/2019/06/1560238770_AviationTaxesImpactsCostsandBenefits.pdf)
- Fradette, L., Lefebvre, S. et Carley, J. (2017, juillet). Demonstration Results of Enzyme-Accelerated CO<sub>2</sub> Capture. *Energy Procedia*, 114, pp. Pages 1100 -1109. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217314431>
- Futura sciences. (s.d.). *Force de trainée*. Repéré à <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-force-trainee-447/>

- Garg, A., Islam Linda, R. et Chowdhury, T. (2013, décembre). Evolution of aircraft flight control system and fly-by-light flight control system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3. Repéré à <https://pdfs.semanticscholar.org/5599/3065df1965846640fd29de183862b4039c7a.pdf>
- Gatwick airport. (s. d.). *Causes of aircraft noise*. Repéré à <https://www.gatwickairport.com/business-community/aircraft-noise-airspace/noise-explained/causes-of-aircraft-noise/>
- Gerbet, T. (2019, 16 janvier). L'impact environnemental des voitures électriques confirmé par un nouveau rapport. *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1137571/vehicule-electrique-essence-electricite-charbon-ges-gaz-effet-serre-pollution>
- Gouvernement du Canada. (2016). *Approche pancanadienne pour une tarification de la pollution par le carbone*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2016/10/approche-pancanadienne-tarification-pollution-carbone.html>
- Gouvernement du Canada. (2019). *Vue d'ensemble de la facturation et de la perception de la taxe de vente*. Repéré à <https://entreprisescanada.ca/fr/gouvernement/impots-et-taxes-tps-tvh/reenseignements-sur-limpot-federal/vue-densemble-de-la-facturation-et-de-la-perception-de-la-taxe-de-vente/>
- Gouvernement du Québec. (2002). *Politique nationale de transport aérien*. Repéré à [https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role\\_ministere/partage-responsabilite-activites/Documents/Politique-nationale-transport-aerien.pdf](https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/partage-responsabilite-activites/Documents/Politique-nationale-transport-aerien.pdf)
- Gouvernement of UK. (2019). *Rates for Air Passenger Duty*. Repéré à <https://www.gov.uk/guidance/rates-and-allowances-for-air-passenger-duty>
- Green Car Congress. (2013). *U Alberta spin-off Forge Hydrocarbons commercializing pyrolytic lipids-to-hydrocarbons process*. Repéré à <https://www.greencarcongress.com/2013/10/20131014-forge.html>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2005). *Carbon dioxide capture and storage*. Repéré à [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf)
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2013). *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Repéré à [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI\\_AR5\\_glossary\\_FR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_FR.pdf)
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2018). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Summary for Policymakers*. Repéré à <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>
- Groupe de recherche et développement en environnement. (2018). *Défi Visez haut !* Repéré à <https://gardn.org/fr/defi-visez-haut/>
- Harvey, F. (2019, 14 mai). UN agency meets to tackle pollution and emissions by ships. *The Guardian*. Repéré à <https://www.theguardian.com/environment/2019/may/14/un-agency-meets-to-tackle-pollution-and-emissions-by-ships>
- Hausfather, Z. (2018, 9 avril). Analysis: How much 'carbon budget' is left to limit global warming to 1.5C? *Carbon Brief*. Repéré à <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-much-carbon-budget-is-left-to-limit-global-warming-to-1-5c>

- Hayden-Lefebvre, T. J. (2019, 19 septembre). Are Aviation Taxes an Effective Answer To Climate Change? *Simple Flying*. Repéré à <https://simpleflying.com/aviation-taxes-climate-change/>
- Holligan, A. (2019, 1er octobre). Jet fuel from thin air: Aviation's hope or hype? *BBC News*. Repéré à <https://www.bbc.com/news/business-49725741>
- Institut pour l'Education Financière du Public. (2019). *Marché du carbone*. Repéré à La finance pour tous: <https://www.lafinancepourtous.com/decryptages/finance-et-societe/nouvelles-economies/finance-verte/marche-du-carbone/>
- International federation of air traffic controller's association. (2017). *Standards and Recommended Practices (SARPs)*. Repéré à <http://www.ifatca.org/about-ifatca/icao-activities/making-standards-and-recommended-practices-sarps/>
- Invest in Canada. (2018). *Aerospace sector*. Repéré à <https://www.international.gc.ca/investors-investisseurs/assets/pdfs/download/vp-aerospace.pdf>
- Jeuland, N. et Penanhoat, O. (2015). Les biocarburants aéronautiques: Une solution d'avenir? *Conférence Arts & Métiers*. Repéré à [https://www.arts-et-metiers.asso.fr/manifestation\\_cr/cr\\_2891.pdf](https://www.arts-et-metiers.asso.fr/manifestation_cr/cr_2891.pdf)
- Juin, T. (2019, 29 mars). Taxe kérosène : attention aux effets pervers ! *Les Echos*. Repéré à <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-une-taxe-kerosene-sur-les-vols-domestiques-aggraverait-la-fracture-territoriale-1004607>
- Kagan, J. (2019). *Value-Added Tax (VAT)*. Repéré à Investopedia: <https://www.investopedia.com/terms/v/valueaddedtax.asp>
- Karagiannopoulos, L. et Solsvik, T. (2018, 4 octobre). Norway will make airlines use more environmentally friendly fuel from 2020. *Reuters*. Repéré à <https://www.reuters.com/article/us-norway-biofuels/norway-will-make-airlines-use-more-environmentally-friendly-fuel-from-2020-idUSKCN1ME25U>
- Karatzos, S., McMillan, J. et Saddler, J. (s. d.). *The potential and challenges of "drop in" fuels*. Repéré à <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/05/P02-The-potential-and-challenges-of-drop-in-biofuels-Karatzos.pdf>
- Kärcher, B. (2018). *Formation and radiative forcing of contrail cirrus*. Repéré à <https://www.nature.com/articles/s41467-018-04068-0.pdf>
- Korber Gonçalves, V. (2017). *Climate change and international civil aviation negotiations*. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/316867677\\_Climate\\_Change\\_and\\_International\\_Civil\\_Aviation\\_Negotiations](https://www.researchgate.net/publication/316867677_Climate_Change_and_International_Civil_Aviation_Negotiations)
- Lafortune, F. (s. d.). Le marché du carbone : un outil clé (mais pas la panacée) pour atteindre les cibles québécoises de réduction de GES. *Forum régional sur la réduction des gaz à effet de serre*. Repéré à <https://www.environnementestrie.ca/deprecated-site/imports/pdf/activites/flafortune.pdf>
- Larousse. (s.d.). *Stratosphère*. Repéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/stratosph%C3%A8re/74832>
- Larsson, J., Elofsson, A., Sterner, T. et Åkerman, J. (2019, janvier). International and national climate policies for aviation : a review. *Climat Policy*, 19(6). Repéré à <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2018.1562871>



- Le Feuvre, P. (2019). *Commentary : Are aviation biofuels ready for take off?* Repéré à <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/march/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off.html>
- Leblanc, É. (2015, 15 février). Les 10 ans du protocole de Kyoto, quel bilan? *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/706861/dix-ans-protocole-kyoto-changements-climatiques-bilan-echec>
- Léveillé, J.-T. (2019, 18 février). Marché du carbone: première vente aux enchères de 2019. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/affaires/economie/quebec/201902/18/01-5215107-marche-du-carbone-premiere-vente-aux-encheres-de-2019.php>
- Lyn Pesce, N. (2019, 21 juin). "Flygskam" is the Swedish travel trend that could shake the global airline industry. *Market Watch*. Repéré à <https://www.marketwatch.com/story/flygskam-is-the-swedish-travel-trend-that-could-shake-the-global-airline-industry-2019-06-20>
- Maertens, S., Grimme, W., Scheelhaase, J. et Jung, M. (2019, octobre). Options to Continue the EU ETS for Aviation in a CORSIA-World. *Sustainability*, 11(20). Repéré à <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/20/5703>
- Market business news. (2019). *Carbon market – definition and meaning*. Repéré à <https://marketbusinessnews.com/financial-glossary/carbon-market/>
- Martel, H. et Lalonde, O. (2018). *Panic érigé*. Repéré à [https://www.agrireseau.net/documents/Document\\_96746.pdf](https://www.agrireseau.net/documents/Document_96746.pdf)
- MBA ESG. (s.d.). *Le Big Data, qu'est-ce que c'est ?* Repéré à <https://www.mba-esg.com/actus/le-big-data-definition>
- McKenzie, D. (2018). *GES : le Canada rate ses cibles, mais les entreprises peuvent faire preuve de leadership*. Repéré à <https://www.cpacanada.ca/fr/nouvelles/canada/2018-09-18-ges-canada-rate-cibles>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2019). *Les gaz à effet de serre*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/questce-ges.htm>
- Metella, H. (2017). *Construction of Forge Hydrocarbon's biofuel production plant set to start*. Repéré à University of Alberta: <https://www.ualberta.ca/agriculture-life-environment-sciences/alesnews/2017/march/construction-of-forge-hydrocarbons-biofuel-production-plant-set-to-start>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019). *Biocarburants*. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants>
- Ministère du Climat et de l'Environnement. (2019). *More advanced biofuel in aviation*. Repéré à <https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/mer-avansert-biodrivstoff-i-luftfarten/id2643700/>
- Mobilité électrique Canada. (2019). *Les ventes de véhicules électriques au Canada – 3e trimestre 2019*. Repéré à [https://emc-mec.ca/wp-content/uploads/EMC-Sales-Report-2019-Q3\\_FR.pdf](https://emc-mec.ca/wp-content/uploads/EMC-Sales-Report-2019-Q3_FR.pdf)
- Nadeau, J.-B. (2019, 19 octobre). Carburer aux déchets. *L'Actualité*. Repéré à <https://lactualite.com/lactualite-affaires/carburer-aux-dechets/>
- Neufeld, R. et Massicotte, P. J. (2017). *La décarbonisation des transports au Canada*. Repéré à [https://sencanada.ca/content/sen/committee/421/ENEV/reports/ENEV\\_TransportationReport\\_FINAL\\_f.pdf](https://sencanada.ca/content/sen/committee/421/ENEV/reports/ENEV_TransportationReport_FINAL_f.pdf)

- Nunez, C. (2019, juillet). Biofuels, explained. *National Geographic*. Repéré à <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/biofuel/>
- Öko-Institut e.V. (2016). *How additional is the Clean Development Mechanism?* Repéré à [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/docs/clean\\_dev\\_mechanism\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/docs/clean_dev_mechanism_en.pdf)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (1944). *Convention relative à l'aviation civile internationale*. Repéré à <https://www.mcgill.ca/iasl/files/iasl/chicago1944a-fr.pdf>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2000). *Politique de l'OACI en matière d'imposition dans le domaine du transport aérien international*. Repéré à [https://www.icao.int/publications/Documents/8632\\_cons\\_fr.pdf](https://www.icao.int/publications/Documents/8632_cons_fr.pdf)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2009). *Changement climatique : Programme d'action*. Repéré à <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/FR/programme-action.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2010). *Environmental report 2010*. Repéré à [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO\\_EnvReport10-Ch2\\_en.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO_EnvReport10-Ch2_en.pdf)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2013a). *Amélioration de la connectivité et de la facilitation du transport aérien*. Repéré à [https://www.icao.int/Meetings/atconf6/Documents/WorkingPapers/ATConf6-wp020\\_fr.pdf](https://www.icao.int/Meetings/atconf6/Documents/WorkingPapers/ATConf6-wp020_fr.pdf)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2013b). *Conférence mondiale de transport aérien*. Repéré à [https://www.icao.int/Meetings/atconf6/Documents/WorkingPapers/ATConf6-wp020\\_fr.pdf](https://www.icao.int/Meetings/atconf6/Documents/WorkingPapers/ATConf6-wp020_fr.pdf)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2013c). *Un sensationnel accord sur les MBM et un solide appui du plan mondial aident à faire de la 38e assemblée de l'OACI un événement*. Repéré à [https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/mbm-agreement-solid-global-plan-endorsements\\_FR.aspx](https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/mbm-agreement-solid-global-plan-endorsements_FR.aspx)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2016a). *Conclusion d'un accord historique en vue de la réduction des émissions*. Repéré à <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/Historic-agreement-reached-to-mitigate-international-aviation-emissions.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2016b). *Environmental report 2016*. Repéré à <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2016c). *Global Air Navigation Plan (2016-2030)*. Repéré à <https://www.icao.int/airnavigation/Documents/GANP-2016-interactive.pdf>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2017). *Sustainable aviation fuels guide*. Repéré à [https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide\\_vf.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2019a). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme : frequently asked questions (FAQs)*. Repéré à [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA\\_FAQs\\_September%202019\\_FINAL.PDF](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_September%202019_FINAL.PDF)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2019b). *CORSIA Emissions Unit Eligibility Criteria*. Repéré à <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Emissions-Units.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2019c). *CORSIA States for Chapter 3 State Pairs*. Repéré à <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/state-pairs.aspx>

- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2019d). *Environmental Report 2019*. Repéré à <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (2019e). *La Secrétaire générale de l'OACI explique les défis futurs de l'aviation lors de la Conférence de Montréal*. Repéré à <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/ICAO-Secretary-General-highlights-future-aviation-challenges-at-Conference-of-Montreal-event.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (s. d.a). *CORSIA Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale : plan de mise en oeuvre*. Repéré à [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CorsiaBrochure\\_8Panels-ENG-Web.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CorsiaBrochure_8Panels-ENG-Web.pdf)
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (s. d.b). *Historique de l'OACI et la Convention de Chicago*. Repéré à <https://www.icao.int/about-icao/History/Pages/FR/default.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). (s. d.c). *Why ICAO decided to develop a global MBM scheme for international aviation?* . Repéré à [https://www.icao.int/environmental-protection/pages/a39\\_corsia\\_faq1.aspx](https://www.icao.int/environmental-protection/pages/a39_corsia_faq1.aspx)
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2017). *Célébrez le 20ème anniversaire du Protocole de Kyoto avec l'ONU*. Repéré à <https://unfccc.int/fr/news/celebrez-le-20eme-anniversaire-du-protocole-de-kyoto-avec-l-onu>
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2019a). *Accord de Paris*. Repéré à [https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg\\_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=\\_fr](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_fr)
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2019b). *Emission Gap Report 2019*. Repéré à <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>
- Organisation maritime internationale (OMI). (2014). *Reduction of GHG emissions from ships : Third IMO GHG Study 2014 – Final Report*. Repéré à <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC%2067-INF.3%20-%20Third%20IMO%20GHG%20Study%202014%20-%20Final%20Report%20%28Secretariat%29.pdf>
- Organisation maritime internationale (OMI). (2018). *Climat : l'OMI adopte une stratégie pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre des transports maritimes*. Repéré à <http://www.imo.org/fr/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>
- Organisation maritime internationale (OMI). (2019). *Sulphur 2020 – cutting sulphur oxide emissions*. Repéré à <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>
- Organisation mondiale de la santé (OMS). (2018). *Lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement*. Repéré à [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0010/383923/noise-guidelines-exec-sum-fre.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0010/383923/noise-guidelines-exec-sum-fre.pdf?ua=1)
- Organisation internationale de normalisation (ISO). (2018). *Gaz à effet de serre — Partie 1: Spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre*.
- Organisation pour l'alimentation et l'agriculture. (2008). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2008*. Repéré à <http://www.fao.org/publications/sofa/2008/fr/>

- Orygeen. (s.d.). *Décarbonisation : Comment limiter l'empreinte carbone?* Repéré à <https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/decarbonisation/>
- Oxley, D. et Jain, C. (2015). *Global air passenger markets: riding out periods of turbulence*. Repéré à [http://www3.weforum.org/docs/TT15/WEF\\_TTCR\\_Chapter1.4\\_2015.pdf](http://www3.weforum.org/docs/TT15/WEF_TTCR_Chapter1.4_2015.pdf)
- Pacific Northwest National Laboratory. (2018). *PNNL Technology Clears Way for Ethanol-Derived Jet Fuel*. Repéré à <https://www.pnnl.gov/news-media/pnnl-technology-clears-way-ethanol-derived-jet-fuel>
- Pavlenko, N. (2017). *Alternative Jet Fuel Development and Deployment in North America*. Repéré à <https://theicct.org/publications/alternative-jet-fuel-development-and-deployment-north-america>
- Pavlenko, N. et Kharina, A. (2018). *Policy and Environmental Implications of Using HEFA+ for Aviation*. Repéré à [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Green-Diesel-Aviation\\_ICCT-Working-Paper\\_20180321\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Green-Diesel-Aviation_ICCT-Working-Paper_20180321_vF.pdf)
- Pelouas, A. (2019, 1er avril). La taxe carbone nationale divise le Canada. *Le Monde*. Repéré à [https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/04/01/la-taxe-carbone-nationale-divise-le-canada\\_5444168\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/04/01/la-taxe-carbone-nationale-divise-le-canada_5444168_3244.html)
- Pidcock, R. et Yeo, S. (2016, 8 août). Analysis: Aviation could consume a quarter of 1.5C carbon budget by 2050. *Carbon Brief*. Repéré à <https://www.carbonbrief.org/aviation-consume-quarter-carbon-budget>
- Planète viable. (2012). *Aérosols atmosphériques et changements climatiques*.
- Plourde, F. (2019, 15 avril). Capter le CO2 de l'atmosphère : une entreprise canadienne voit grand. *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1164262/squamish-carbon-engineering-capture-carbone-bhp-chevron-climat>
- Poulain, C. (2014). *Les biocarburants sur la sellette*. Repéré à Institut national de la recherche agronomique INRA: <http://www.inra.fr/Grand-public/Chimie-verte/Toutes-les-actualites/Biocarburants-premiere-generation>
- Programme des Nations unies pour l'environnement. (2018). *Emissions gap report 2018*. Repéré à [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26895/EGR2018\\_FullReport\\_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26895/EGR2018_FullReport_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Programme des Nations unies pour le développement. (s. d.). *Glossary*. Repéré à <https://www.sdfinance.undp.org/content/sdfinance/en/home/glossary/>
- RAD (Réalisateur). (2019, 14 octobre). *Pourquoi la taxe carbone dérange | 21-25 | Élections Canada 2019* [Vidéo en ligne]. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=vdolmgYPH8Q>
- Redaelli, S. (2016). Industrial scale demonstration biorefinery on lignin-based aviation fuel. (1). Repéré à [https://www.biorefly.eu/images/Newsletters/Issue\\_1\\_BIOREFLY\\_Newsletter.pdf](https://www.biorefly.eu/images/Newsletters/Issue_1_BIOREFLY_Newsletter.pdf)
- Ressources naturelles Canada. (2018). *Biodiesel*. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/efficacite-energetique-pour-les-transport-et-carburants-de-remplacement/carburants-de-remplacement/biocarburants/biodiesel/3510>
- Ressources naturelles Canada. (2019). *Taxes sur les carburants au Canada*. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/marches-nationaux-et-internationaux/prix-des-carburants-de-transport/taxes-sur-les-carburants-au-canada/18886>

- Reyers, O. (s.d.). *Au-delà des marchés du carbone*. Repéré à Nations Unies: <https://www.un.org/fr/chronicle/article/au-dela-des-marches-du-carbone>
- Ricardo Energy & Environnement. (2018). *Pan-Canadian Carbon Pricing*. Repéré à <https://es.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2018/10/Pan-Canadian-Carbon-Pricing-Case-Study-FINAL.pdf>
- Rogelj, J. et Forster, P. (2019, 17 juillet). Guest post: A new approach for understanding the remaining carbon budget. *Carbon Brief*. Repéré à <https://www.carbonbrief.org/guest-post-a-new-approach-for-understanding-the-remaining-carbon-budget>
- SAF+ Consortium. (s. d.). *Qui sommes-nous*. Repéré à <https://safplusconsortium.com/fr/>
- Saher, M., Bellringer, C., Ricard, N., MacPherson, K., Mullaley, J., Pickup, M. A., . . . Gelfand, J. (2018). *Perspectives sur l'action contre les changements climatiques au Canada — Rapport collaboratif de vérificateurs généraux — mars 2018*. Repéré à [http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/parl\\_otp\\_201803\\_f\\_42883.html](http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/parl_otp_201803_f_42883.html)
- Santerre, C. (2013, février-mars). Externalités et économie de l'environnement. *À babord* ! (48). Repéré à <https://www.ababord.org/Externalites-et-economie-de-l>
- Statistique Canada. (2019). *Trafic aérien de passagers selon le secteur*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/190725/cg-c002-fra.htm>
- Schulz, E. (2018). *Global networks, global citizens*. Repéré à <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/media-day/Presentation-Eric-Schulz-GMF-2018.pdf>
- Seely, A. (2019). *Taxing aviation fuel*. House of Common Library.
- Service technique de l'aviation civile (STAC). (2016). *Aviation et climat : Analyse des moyens d'action publique pour limiter l'impact de l'aviation sur le changement climatique*. Repéré à [https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/sites/default/files/aviation\\_et\\_climat.pdf](https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/sites/default/files/aviation_et_climat.pdf)
- Service technique de l'aviation civile (STAC). (2019). *Aviation et pollution atmosphérique*. Repéré à <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/environnement/aviation-pollution-atmospherique>
- SESAR Joint Undertaking. (2019). *SESAR solutions : catalogue 2019*. Repéré à [https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/SESAR\\_Solutions\\_Catalogue\\_2019\\_web.pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/SESAR_Solutions_Catalogue_2019_web.pdf)
- Sia Partners. (2016). *Face à la croissance du trafic aérien : les grands projets d'infrastructures des aéroports*. Repéré à <http://transport.sia-partners.com/face-la-croissance-du-traffic-aerien-les-grands-projets-dinfrastructures-des-aeroports>
- Sky brary. (2015). *Reduced Vertical Separation Minima (RVSM)*. Repéré à [https://www.skybrary.aero/index.php/Reduced\\_Vertical\\_Separation\\_Minima\\_\(RVSM\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Reduced_Vertical_Separation_Minima_(RVSM))
- Sky brary. (2019). *SESAR*. Repéré à <https://www.skybrary.aero/index.php/SESAR>
- Stay Grounded. (2018). *L'illusion de l'aviation verte*. Repéré à <https://stay-grounded.org/wp-content/uploads/2019/02/lillusion-de-laviation-verte.pdf>
- Stockholm Environment Institute et Greenhouse Gas Management Institute. (s.d.). *Mandatory & Voluntary Offset Markets*. Repéré à <https://www.co2offsetresearch.org/policy/MandatoryVsVoluntary.html>

- Stolte, E. (2018, 19 février). Five minutes from trash to ethanol: Edmonton's long-delayed Enerkem plant explained. *Edmonton Journal*. Repéré à <https://edmontonjournal.com/business/local-business/five-minutes-from-trash-to-ethanol-edmontons-long-delayed-enerkem-plant-explained>
- Surprenant, R. (2017). Enzyme enabled. *COSIA Innovation Summit*. Calgary. Repéré à [https://co2solutions.com/media/upload/2018/12/14/2017-03-21\\_cosia\\_innovation\\_summit.pdf](https://co2solutions.com/media/upload/2018/12/14/2017-03-21_cosia_innovation_summit.pdf)
- Sussams, L. (2018). Carbon Budgets Explained. *Carbon Tracker*. Repéré à <https://www.carbontracker.org/carbon-budgets-explained/>
- Tavernier, E. (2017). *Comprendre le marché du carbone*. Repéré à Coalition climat Montréal: <https://coalitionclimatmtl.org/fr/comprendre-le-marche-du-carbone/>
- The new dictionary of cultural literacy. (s. d.). *troposphere*. Repéré à <https://www.dictionary.com/browse/troposphere>
- Timperley, J. (2019, 4 février). Corsia: The UN's plan to "offset" growth in aviation emissions after 2020. *Carbon brief*. Repéré à <https://www.carbonbrief.org/corsia-un-plan-to-offset-growth-in-aviation-emissions-after-2020>
- Tourism & Transport Forum Australia. (2013). *Passenger movement charge explained*. Repéré à <https://www.ttf.org.au/wp-content/uploads/2016/06/TTF-Passenger-Movement-Charge-Explainer-2013.pdf>
- Transport & Environment. (2009). *Combustibles de soute et le Protocole de Kyoto : Comment l'OACI et l'OMI ont échoué à l'épreuve du changement climatique*. Repéré à [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2009\\_06\\_00%20T%26E%20Combustibles%20de%20soute%20et%20le%20Protocole%20de%20Kyoto.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2009_06_00%20T%26E%20Combustibles%20de%20soute%20et%20le%20Protocole%20de%20Kyoto.pdf)
- Transport & Environment. (2017). *The non-CO<sub>2</sub> impacts of aviation must be tackled*. Repéré à [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017\\_06\\_non-CO2\\_aviation\\_briefing\\_final\\_0.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017_06_non-CO2_aviation_briefing_final_0.pdf)
- Transport & Environment. (2019). *Why ICAO and Corsia cannot deliver on climate*. Repéré à <https://www.transportenvironment.org/publications/why-icao-and-corsia-cannot-deliver-climate>
- Transport & Environment. (s. d.). *Shipping and climate change*. Repéré à <https://www.transportenvironment.org/what-we-do/shipping-and-environment/shipping-and-climate-change>
- Transport Canada. (2012). *Plan d'action du Canada pour réduire les effets de gaz à effet de serre provenant de l'aviation*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/emissions-aviation-3005.htm>
- Transport Canada. (2016). *Le ministre Garneau présente sa stratégie pour l'avenir des transports au Canada : Transports 2030*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/transports-canada/nouvelles/2016/11/ministre-garneau-presente-strategie-avenir-transports-canada-transports-2030.html>
- Transport Canada. (2017). *Transport aérien*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/anre-menu-3018.htm>
- Transport Canada. (2018a). *Les transports au Canada : un survol*. Repéré à [https://www.tc.gc.ca/media/documents/politique/Les\\_Transports\\_au\\_Canada\\_2017nwf.pdf](https://www.tc.gc.ca/media/documents/politique/Les_Transports_au_Canada_2017nwf.pdf)
- Transport Canada. (2018b). *Rapport annuel 2017*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/2017-emissions-gaz-effet-serre-rapport-annuel-resume.html>

- Trévidic, B. (2019, 8 novembre). La France et huit pays européens réclament une taxe CO2 sur les billets d'avion. *Les Echos*. Repéré à <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/la-france-et-huit-pays-europeens-reclament-une-taxe-co2-sur-les-billets-davion-1146662>
- Trévidic, B. (2019, 25 septembre). L'environnement échauffe les esprits à la conférence de l'aviation civile internationale. *Les Echos*. Repéré à <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/l'environnement-echauffe-les-esprits-a-la-conference-de-laviation-civile-internationale-1134576>
- United-States Energy Information Administration. (2019). *Biofuels explained*. Repéré à <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/>
- Universalis. (s.d.). *EXTERNALITÉ, économie*. Repéré à <https://www.universalis.fr/encyclopedie/externalite-economie/>
- W. Keith, D., Holmes, G., St. Angelo, D. et Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere. *Joule*, 2(8). Repéré à [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(18\)30225-3](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(18)30225-3)
- Ward, B. et Hicks, N. (2018). *What is the "polluter pays" principle?* Repéré à <http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/faqs/what-is-the-polluter-pays-principle/>
- Webster, A. (2019, septembre). Urgence climatique et équité sociale : plaidoyer pour une tarification du carbone. *Le Climatoscope*. Repéré à <http://www.climatoscope.ca/>
- Western Climate Initiative, I. (s. d.). *Western Climate Initiative, inc.* Repéré à <http://www.wci-inc.org/fr/>
- Wikipédia. (2019). *Surface mouillée*. Repéré à Wikipédia: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Surface\\_mouill%C3%A9e](https://fr.wikipedia.org/wiki/Surface_mouill%C3%A9e)
- Xia, L., Omidghane, M., Chae, M. et C. Bressler, D. (2015). *Biosolids: Feedstock For Lipid To Hydrocarbon Technology (LTH) For Biofuel Production*. Repéré à University of Alberta: <https://bcn.ualberta.ca/events/6th-annual-bioindustrial-meeting-november-22-25-2015/conference-abstracts/student-competition-lightning-rounds/biosolids-feedstock-for-lipid-to-hydrocarbon-technology-lth-for-biofuel-production/>

**ANNEXE 1 – PAYS PARTICIPANTS À LA PHASE VOLONTAIRE DU PROGRAMME CORSIA** (tiré de :  
Maertens et al., 2019, octobre)

---

1. Albania	22. Estonia	44. Malaysia	66. Serbia
2. Armenia	23. Finland	45. Malta	67. Singapore
3. Australia	24. France	46. Marshall Islands	68. Slovakia
4. Austria	25. Gabon	47. Mexico	69. Slovenia
5. Azerbaijan	26. Georgia	48. Monaco	70. Spain
6. Belgium	27. Germany	49. Montenegro	71. Sweden
7. Bosnia and Herzegovina	28. Ghana	50. Namibia	72. Switzerland
8. Botswana	29. Greece	51. Netherlands	73. Thailand
9. Bulgaria	30. Guatemala	52. New Zealand	74. Turkey
10. Burkina Faso	31. Guyana	53. Nigeria	75. Uganda
11. Cameroon	32. Hungary	54. North Macedonia	76. Ukraine
12. Canada	33. Iceland	55. Norway	77. United Arab Emirates
13. Costa Rica	34. Indonesia	56. Papua New Guinea	78. United Kingdom
14. Croatia	35. Ireland	57. Philippines	79. United States
15. Cyprus	36. Israel	58. Poland	80. Zambia
16. Czech Republic	37. Italy	59. Portugal	
17. Democratic Republic of Congo	38. Jamaica	60. Qatar	
18. Denmark	39. Japan	61. Republic of Korea	
19. Dominican Republic	40. Kenya	62. Republic of Moldova	
20. El Salvador	41. Latvia	63. Romania	
21. Equatorial Guinea	42. Lithuania	64. San Marino	
	43. Luxembourg	65. Saudi Arabia	

---



**ANNEXE 2 – TAXES AÉRIENNES MISES EN PLACE DANS DIFFÉRENTS PAYS** (tiré de : CE Delft, 2018)

Country	Name of tax	Year of introduction <sup>3</sup>	Tax rate and distance groups (economy class)	Exemptions <sup>4</sup>
<b>EU</b>				
Austria	Air Transport Levy	2012	€ 7 EU flights, € 15 medium, € 35 long	Transit <sup>5</sup> and transfer <sup>6</sup> passengers
Belgium*	Ticket tax Zaventem	1995	12 frank (€ 0.3)	Unknown
France	Air Passenger Solidarity Tax	2006	€ 1 for economy domestic and EU flights, € 10 for first class domestic and EU flights, € 4 for long flights economy, € 40 for long flights first class	Transit passengers
	Civil aviation tax	1999	€ 4.31 for domestic and EU flights, € 7.75 per passenger to other destinations, € 1.29 per tons of freight or mail to any destinations	Transit passengers
Germany	Air Travel Tax	2011	€ 7.47 for EU flights, medium distances between 2,500 km and 6,000 km at € 23.32, longer distances € 41.99	Transit and transfer passengers
Hungary**	Air Departure tax	2005	€ 6-19.90 for international flights	Transit passengers
Ireland*	Air Travel Tax	2009	From 2012-2014 it was a € 3 rate for all flights	Transit and transfer passengers
Italy**	Embarkation Tax	1993	€ 3.48 for EU flights, € 7.72 for longer flights	Transit and transfer passengers

<sup>3</sup> In some cases the year of introduction is not included in the IATA list, hence in these cases the oldest year mentioned in the description was used.

<sup>4</sup> Only exemptions for transit and transfer passengers will be listed since the range of exemptions is too large to include in Table 1.

<sup>5</sup> Passengers who remain on the same flight during an intermediate stop.

<sup>6</sup> Passengers who transfer to a different flight to reach their destination.

# **TAXES AÉRIENNES MISES EN PLACE DANS DIFFÉRENTS PAYS (suite)** (tiré de : CE Delft, 2018)

Country	Name of tax	Year of introduction <sup>3</sup>	Tax rate and distance groups (economy class)	Exemptions <sup>4</sup>
Lithuania**	Airport tax	2008	LTL 20-45 international flights depending on airport departure, LTL 10-20 for domestic flights	Transit passengers
Luxembourg	Passenger Service Charge	2002	€ 3 for all flights	Transit passengers
Netherlands*	Air Passenger Tax	2008	€ 11.25 for domestic and EU flights, € 45 for longer flights	Transit and transfer passengers
Romania**	Airport Departure Tax	2009	€ 2-7.20 for domestic flights, € 3-14.20 for international flights	Transit and transfer passengers
Slovakia**	Embarkation Tax	2009	€ 3.15-6.97 for domestic flights depending on airport, € 8.13-16.27 for international flights depending on airport	Transit passengers
United Kingdom	Air Passenger Duty	1994	£ 13 (€ 15) for domestic and EU flights, £ 75 (€ 88) for longer flights	Transit and transfer passengers
<b>Non-EU</b>				
Australia	Passenger Movement Charge	1995	\$AUD 55 (€ 40) per passenger	Transit passengers
Brazil**	Embarkation Tax	2005	BRL 27-81 (€ 8-24)	Transfer passengers
Norway	Air Passenger Tax	2016	NOK 80 (€ 9) per passenger	Transit and transfer passengers
United States of America	Transportation Tax	1997	7.5% for domestic flights, \$ 13.40 (€ 13) for international flights departing or arriving in the USA	Transit and transfer passengers
South Africa	Air Passenger Tax	2005	R120 (€ 9) for international departures	Transit and transfer passengers
Philippines	Travel Tax	1991	PHP 1620 (€ 30)	Other

\* Abolished or zero-rated ticket tax.

\*\* Unknown whether the tax is still in operation or not.